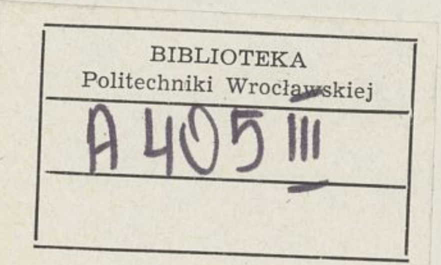


Biblioteka Główna i OINT
Politechniki Wrocławskiej
100100161392



ZEITSCHRIFT FÜR BAUWESEN.

HERAUSGEGEBEN

IM

MINISTERIUM DER ÖFFENTLICHEN ARBEITEN.

BEGUTACHTUNGS-AUSSCHUSZ:

O. HOSSFELD, GEHEIMER OBERBAURAT.

Dr.=Ing. L. SYMPHER, GEHEIMER OBERBAURAT.

M. KUMBIER, GEHEIMER BAURAT.

SCHRIFTLEITER:

FRIEDRICH SCHULTZE und GUSTAV MEYER.



64. JAHRGANG 1914.

MIT 63 TAFELN IN FOLIO UND VIELEN IN DEN TEXT EINGEDRUCKTEN ABBILDUNGEN.



BERLIN 1914.

VERLAG VON WILHELM ERNST u. SOHN.

GROPIUS'SCHE BUCH- UND KUNSTHANDLUNG.

WILHELMSTRASZE 90.

Inhalt des vierundsechzigsten Jahrganges.

A. Landbau.

B. Wasser-, Schiff-, Maschinen-, Wege- und Eisenbahnbau.

C. Kunstgeschichte und Archäologie.

D. Bauwissenschaftliche Mitteilungen.

E. Anderweitige Mitteilungen.

Statistische Nachweisungen,

im Auftrage des Herrn Ministers der öffentlichen Arbeiten bearbeitet, betreffend:

1913. 1395

JAHRGANG LXIV. 1914. HEFT I BIS III.

Der Neubau des Regierungsgebäudes in Stettin.

(Mit Abbildungen auf Blatt 1 bis 5 im Atlas.)



Abb. 1. Uhrturm im großen Schloßhof (Südseite).

Ein Zeitraum von fast zwei Jahrhunderten verknüpft die Geschichte der Königlichen Regierung in Stettin mit der des Stettiner Schlosses. Denn so lange (etwa seit 1720) hat, mit einer kurzen Unterbrechung von 1809 bis 1813, das Schloß als Sitz der Regierung und derjenigen Behörden gedient, die ihr vorangingen.

Mit vier dreigeschossigen Flügeln umschließt es einen trapezförmigen Hof von etwa 53/57 m mittlerer Größe, den großen Schloßhof (Text-Abb. 2). In seiner Mitte erhebt sich, von einer Lindengruppe überschattet, ein im Jahre 1831 errichtetes schlichtes Erzbild des Großen Kurfürsten, an den Hohenzollernfürsten mahnend, dem die preußische Monarchie den Gewinn Pommerns verdankt. Mit den grauen, fensterreichen Mauern, mit den wuchtigen Türmen des Schlosses, zumal mit dem Turme des Südflügels (Text-Abb. 1), dessen Kunstuhr als altes Wahrzeichen Stettins von jeher Besucher anlockte, fügt diese Gruppe sich zu einem Bilde von hohem malerischem Reize zusammen. — Nach Süden öffnet sich der Schloßhof mit breiter Einfahrt gegen die engen und düsteren Straßen der Altstadt. Vor den Westflügel des Schlosses legt sich, durch den langgestreckten Münzflügel abgeschlossen, ein zweiter schmalerer Hof, der Münzhof vor, nach Norden und Süden durch überbaute Einfahrten gegen die angrenzenden Straßen sich öffnend.

Wenn auch die einzelnen Teile des Schlosses äußerlich ein fast übereinstimmendes Gepräge tragen, so dehnt seine Baugeschichte sich doch über Jahrhunderte aus. An Stelle älterer Baulichkeiten errichtete der Pommernherzog Barnim III. († 1368) auf der Schloßhöhe, die damals nach der Oder und nach Norden zu (Klosterhof) noch unbebaut gewesen sein mag und den Flußlauf beherrschte, schon um die Mitte des XIV. Jahrhunderts ein festes Haus mit verschiedenen Nebengebäuden. Von ihnen allen und namentlich von dem stattlichen St. Ottendome, einer basilikalen Kreuzkirche ohne Turm, die der gleichen Entstehungszeit angehörte, sind erkennbare Reste auf unsere Zeit nicht überkommen. Die Bauten Barnims III. nahmen etwa die Stelle des jetzigen Nordflügels ein.

Der jetzige Südflügel des Schlosses umschließt dessen älteste Teile. Noch sind hier in den Untergeschossen die alten Umfassungsmauern des „neuen" oder „großen Hauses" erhalten, das um 1503 Herzog Bogislav X. (1474 bis 1523), der kraftvollste und bedeutendste unter allen pommerschen Fürsten, auf einem Gelände errichtete, dessen Abtretung er nach Streit und Fehde mit dem Rate der Stadt erzwungen hatte. Der Fangerturm an der Straßenseite und auch der Uhrturm an der Hofseite dieses Flügels (*b* u. *c* Text-Abb. 1) sind Teile jenes Bogislavbaues. Ihr ursprüngliches spätgotisches Blenden- und Nischenwerk, in Backsteinformen durchgeführt, verschwand bei dem Umbau unter Friedrich Wilhelm I. nach 1720 unter einer barocken Putzverkleidung. Den baulich bedeutsamsten Teil seiner ursprünglichen Anlage enthält der Südflügel noch heute in seinen prächtigen Netz- und Sterngewölben (im Erdgeschosse und in den oberen Geschossen des Fangerturmes).

Den bis dahin nach Osten noch offenen Schloßhof schloß im Jahre 1538 Herzog Barnim XI., Bogislavs X. Sohn, durch einen neuen Flügel, der aber bereits 1551 einem Brande zum Opfer fiel und von dem gegenwärtig wenig mehr vorhanden ist als eine steinerne Wappentafel, die an der Hoffront des später (um 1560) in den Formen der italienischen Renaissance entstandenen Ersatzbaues eingesetzt wurde.

Erst dem Umbau, den 1575 bis 1577 der prachtliebende Herzog Johann Friedrich unternahm, verdankt das Schloß im wesentlichen seine heutige Gestalt. Nur der Bogislavbau (Südflügel 1503) und der soeben erst errichtete neue Barnimsbau (Ostflügel, 1560) blieben erhalten und unverändert; alles übrige, namentlich auch die St. Ottenkirche, wurde niedergelegt und nach neuem einheitlichem Plane unter Leitung eines italienischen Architekten Antonius Wilhelm in Renaissanceformen wiederaufgebaut. Der Neubau, der also im wesentlichen den jetzigen Nordflügel samt der Schloßkirche und den Westflügel umfaßte, war 1577 fertig.

Herzog Philipp II. († 1618) errichtete schließlich im zweiten Jahrzehnt des 17. Jahrhunderts an dem damaligen

Kronenhofe (jetzt Münzhof) in den Formen der deutschen Renaissance den jetzigen Münzflügel und brachte damit die Gesamtanlage, von kleineren späteren Zutaten abgesehen, zu der Ausdehnung, die sie noch heute aufweist. Nach der Inschrift auf der an der Hofseite des Gebäudes angebrachten reichen Wappentafel erfolgte der Abschluß dieses Baues erst 1619 unter der Regierung des Herzogs Franz.

Der damalige Glanz des pommerschen Herzogsschlosses war nicht von langer Dauer. Zwar verschonte der dreißigjährige Krieg, so schwer er in seiner zweiten Hälfte auch Pommern und seine Hauptstadt heimsuchte, das Schloß noch mit gewaltsamen Zerstörungen. Aber mitten in seinen Wirren starb 1637 Bogislav XIV., der letzte vom Mannesstamm des Wendengeschlechtes; Stettin mit Vorpommern kam im Westfälischen Frieden an Schweden. Das Schloß wurde Sitz der Landesregierung, seine Kunstschätze wurden in alle Welt zerstreut.

Im schwedisch-polnischen Kriege (1655 bis 1660) wurde das von den Schweden besetzte Stettin durch die Polen und die Kaiserlichen belagert (1657). Die Beschießung dauerte sieben Wochen; die Stadt litt schwer darunter; über die Beschädigungen, die das Schloß erfuhr, ist nichts überliefert. Schwereres hatte es nach dem Einfall der Schweden in die Mark (1674) und nach der Schlacht bei Fehrbellin durchzumachen. Der Kurfürst Friedrich Wilhelm vertrieb die Schweden aus Vorpommern; 1677 fiel auch Stettin nach halbjähriger Belagerung in seine Hände. Die Stadt hatte durch wiederholte Beschießungen furchtbar gelitten; die Hälfte ihrer Wohnstätten lag in Schutt und Asche, die Kirchen waren ausgebrannt, das Schloß durch die auf der Nordseite der Stadt errichteten Batterien jämmerlich zerschossen. Ob eine durch den Kurfürsten damals eingeleitete Wiederherstellung zustande gekommen, darüber sind Nachrichten nicht erhalten: wahrscheinlich nicht, denn der Kurfürst wurde gar bald zur Herausgabe Pommerns infolge der Bedrohung seiner rheinischen Lande durch die Franzosen gezwungen.

Was die Schweden alsdann für die Instandsetzung des Schlosses getan, und welche Beschädigungen dieses im nordischen Kriege bei der Belagerung durch die Russen unter Menzikoff (1713) erlitt, ist nicht bekannt. Der Bogislavbau (Südflügel), der seinen ehemaligen reichen Giebelschmuck eingebüßt hatte, erhielt ihn nicht wieder, als Friedrich Wilhelm I. nach dem Frieden von Stockholm (1720), der Stettin endlich dauernd für Preußen gewann, mit dem Hause einen durchgreifenden Ausbau vornahm und es in ein Arsenal verwandelte. Dabei erhielt es über dem zweiten Stockwerke ein mächtiges Mansardendach, das bis nach 1870 bestand. In den langgestreckten Philippsbau (Münzflügel) wurde der heute noch vorhandene, ebenfalls mit einem Mansardendache überdeckte und in den Münzhof vorspringende, zopfige Mittelbau eingefügt, wahrscheinlich wohl, um eine Bresche zu schließen; er hebt sich in Form und Ausführungsart noch heute deutlich von den um ein Jahrhundert älteren Seitenteilen ab. Der Schloßkirchenturm und der Uhrturm erhielten, ebenfalls wohl an Stelle zerschossener Dächer, ihre jetzigen durchbrochenen welschen Hauben, diejenige des Kirchturms durch besonders kraftvolle Form und Umrißlinie ausgezeichnet, beide überragt von vergoldeten Königskronen und dem Monogramm ihres königlichen Erbauers. Auch die astronomische Uhr wurde damals wiederhergestellt; die auf ihr angebrachte Jahreszahl bezeichnet wohl den Abschluß dieser langen Bautätigkeit (1736).

Von den Behörden, die, dem Bauhandwerker auf dem Fuße folgend, im Verlaufe der Wiederherstellungsarbeiten damals die Räume des Schlosses besetzten, werden Regierung sowie Kriegs- und Domänenkammer zuerst genannt, bald darauf (1725) auch das Archiv. Ferner erhält der Kommandant von Stettin — damals der Fürst von Anhalt-Zerbst dort seine Dienstwohnung; auch Beamte der Landesverwaltung (z. B. der Oberforstmeister), ferner der Schloßprediger und zahlreiche Unterbeamte fanden Aufnahme. Vorübergehend nahm (nach 1750) der Münzflügel, der danach seinen Namen behielt, eine Münzstätte auf.

Aber auch für Zwecke der Krone wurden die Räume des Schlosses in Anspruch genommen. Im Jahre 1769 wurde die bis dahin durch den Stadtkommandanten benutzte Wohnung der Prinzessin Elisabeth von Preußen und ihrem kleinen Hofstaate eingeräumt. Über die damalige Verteilung der Räume im Schlosse, die im wesentlichen noch lange Zeit unverändert blieb, sind genaue Aufzeichnungen vorhanden: ihnen nachzugehen ist ohne allgemeines Interesse. Vorübergehend siedelte während der Zeit der französischen Besetzung die Regierung nach Stargard über (1809 bis 1813). Auch nach ihrer Rückkehr, nach der Reorganisation der Behörden (1810) und auch in späteren Jahren ist in der Besetzung des Schlosses keine wesentliche Änderung eingetreten. Ende 1830 befanden sich darin das Oberpräsidium, die Regierung, das Oberlandesgericht und (seit 1811) das Stadtgericht. In der „2. Etage" wohnte auch zu dieser Zeit noch die Prinzessin Elisabeth. Eine Reihe von Unterbeamten hatte ebenfalls Wohnung im Schlosse.

Erst der Regierungsantritt Friedrich Wilhelms IV. und der Tod der Prinzessin (1840) brachte Umwälzungen. Ihre bisherige Wohnung wurde umgebaut und mit den jetzigen Königlichen Gesellschaftsräumen z. T. zu einem Absteigequartier für den Hof eingerichtet; die Festtreppe, die dieses mit den Remtern im Erdgeschoß des Nordflügels verbindet, sowie auch der achteckige Fahnenturm an der Nordostecke des Schlosses sind bauliche Zutaten dieser Zeit; der Nordflügel wurde bis zur Schloßkirche um ein Stockwerk erhöht. Gleichzeitig erfuhr der Ostflügel im Innern Umbauten, teils um für die anwachsende Regierung Raum zu gewinnen, teils um (an Stelle der Prinzessin) den Oberpräsidenten der Provinz aufzunehmen, der seitdem im Schlosse Dienstwohnung hat.

Vermehrtes Raumbedürfnis der Regierung nötigte in den Jahren 1872 bis 1874 zu einem letzten größeren Umbau, der den Südflügel innen und außen zum zweiten Male umgestaltete. Er verlor dabei sein Mansardendach, an dessen Stelle trat ein drittes Stockwerk, in dem die prächtige und wohlerhaltene spätgotische Balkendecke Aufnahme fand, die, noch dem alten Bogislavbau angehörend, bis dahin sich über dem ersten Stockwerke befunden hatte. Der so gewonnene Raum wurde den Sammlungen des pommerschen Altertumsvereins eingeräumt, der auch vorher schon im Schlosse Unterkunft gehabt hatte. — Die Militärverwaltung (Zeughaus) räumte das bisher von ihr besetzte Erdgeschoß, das nunmehr vom Staatsarchiv eingenommen wurde; das erste Stockwerk wurde von der Kirchen- und Schulabteilung, das zweite von der Steuerabteilung der Regierung bezogen, die im

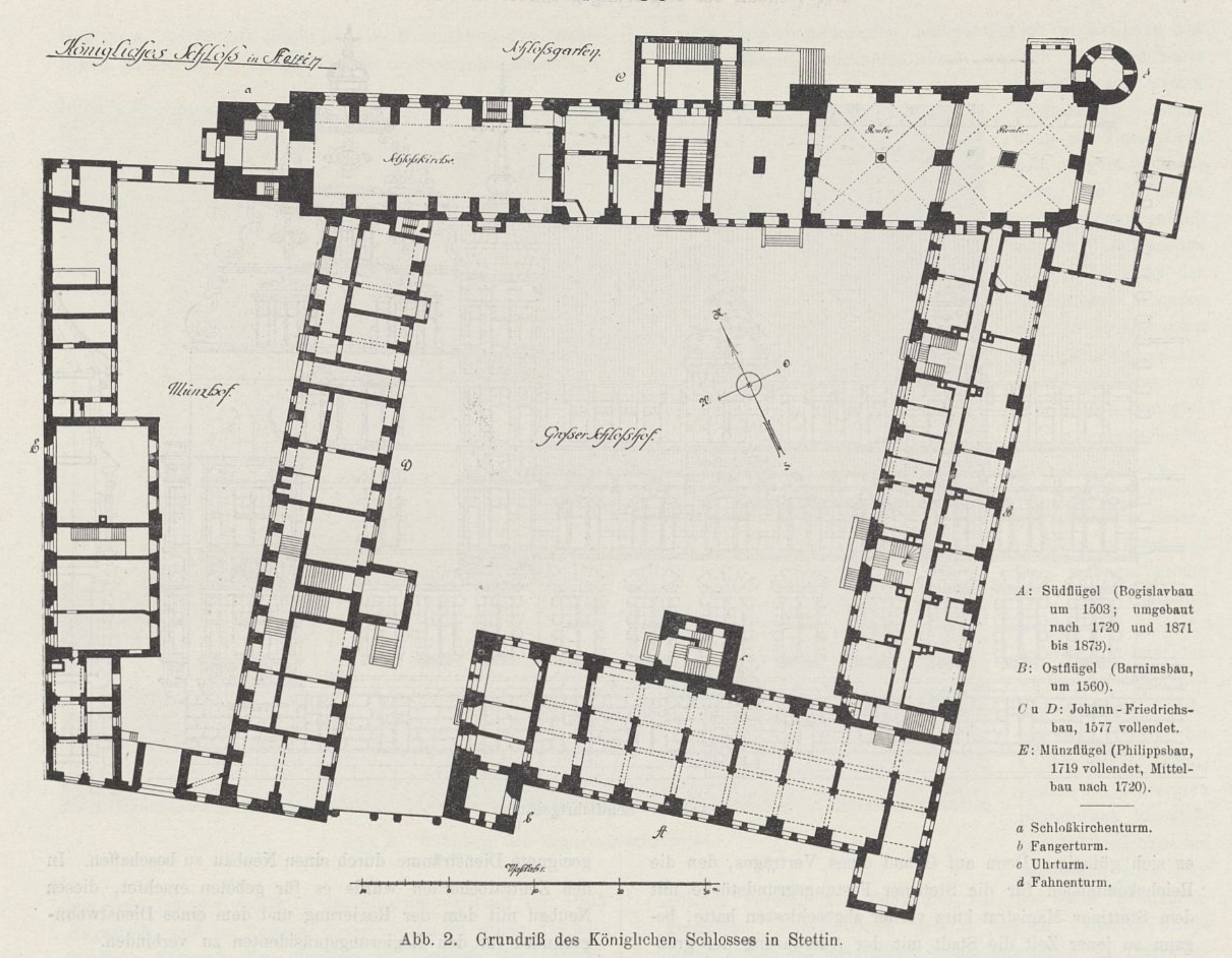


Abb. 2. Grundriß des Königlichen Schlosses in Stettin.

übrigen ihren alten Besitzstand — zweites Stockwerk im Nord- und Ostflügel (Präsidialabteilung) sowie die südliche Hälfte im Erdgeschoß des Westflügels (Hauptkasse) — behielt. — Eine Raumverschiebung trat nur noch einmal (1901) ein, als das Regierungsarchiv mit dem in einem Neubau anderweit untergebrachten Staatsarchiv (Zentralbl. d. Bauverwalt. 1901, S. 362) vereinigt wurde und das Erdgeschoß des Südflügels räumte, das alsdann z. T. von der Katasterverwaltung der Regierung, z. T. vom Provinzial-Schulkollegium in Gebrauch genommen wurde.

Mit diesen Räumen hat die in den letzten Jahrzehnten immer schneller anwachsende Behörde seither sich abzufinden gesucht, so gut es anging. Das wurde auf die Dauer aber immer schwieriger. Bald waren die Räume, zu denen nach keiner Seite hin ein Zuwachs mehr zu gewinnen war, überfüllt, die vorhandenen Sitzungssäle zu Arbeitsräumen aufgeteilt; die zweifenstrigen, räumlich an sich schon recht beschränkten Zimmer dienten bis zu vier Personen zum Aufenthalt; außer den Abteilungsdirigenten genossen nur noch sehr wenige Dezernenten den Vorzug eines Einzelzimmers. Besonders drückend waren die Raumnöte in Kasse und Kanzlei, gänzlich überfüllt und unzureichend die sämtlichen Registraturen. Diese bildeten — ebenso wie die mit Akten bis in die äußersten Winkel angefüllten Dachböden — wegen ihrer Feuergefährlichkeit einen Gegenstand dauernder Besorgnis. Dabei näherte der an sich schon kümmerliche Innenausbau des Ostflügels sich mehr und mehr völliger Abgängigkeit; seine Instandhaltung stellte immer stärker wachsende Ansprüche an den Baufonds.

Vollends unhaltbar wurden für die Regierung die Zustände zeitweise infolge der Unsicherheit der Eigentumsfrage des Schlosses, auf das außer dem Staate noch die Krone Ansprüche erhob. Denn wenn Se. Majestät der Kaiser und König gelegentlich im Schlosse Wohnung nahm, mußten regelmäßig für Gefolge und Dienerschaft etwa dreißig Zimmer abgetreten werden. Daß dabei der Dienstbetrieb ordnungsmäßig sich schwer aufrechterhalten ließ, liegt auf der Hand. Es nimmt wunder, daß die Notwendigkeit, die Behörde aus diesen drückenden Zuständen zu lösen, nicht schon früher zur Erörterung gebracht worden ist. Wie dringlich sie war, ergab sich alsbald aus der ungewöhnlichen Schnelligkeit, mit der die Sache, einmal in Gang gebracht, verlief. Als ein an die beteiligten Ressortminister gerichteter Bericht des Regierungspräsidenten vom 23. September 1901 sie zum ersten Male vorführte, schlugen seine Angaben und Gründe ohne weiteres durch.

Schon damals wurde der Platz, auf dem sich heute der Neubau erhebt, für ihn in Vorschlag gebracht. Damit traf

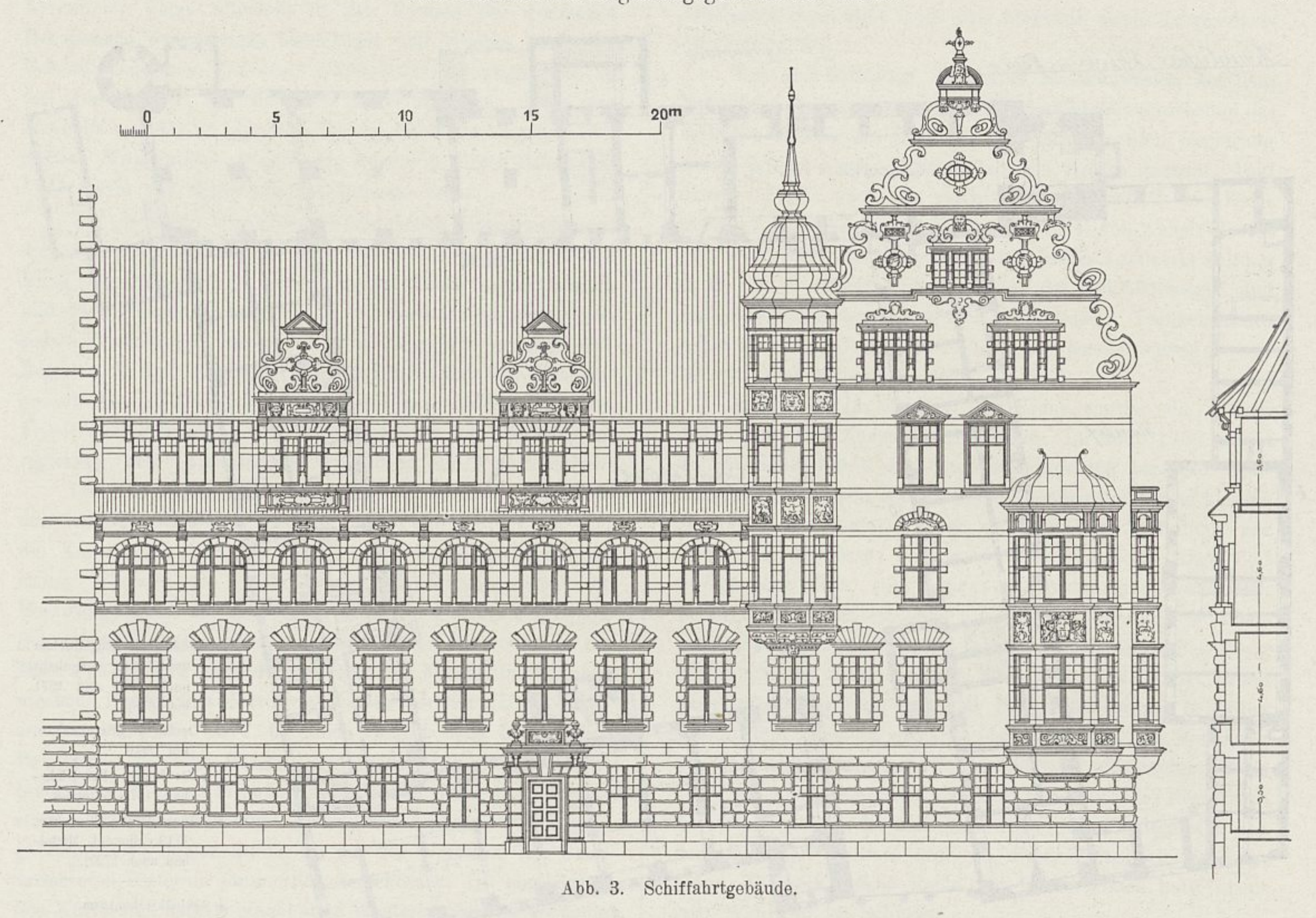


Abb. 3. Schiffahrtgebäude.

es sich günstig. Denn auf Grund eines Vertrages, den die Reichskommision für die Stettiner Festungsgrundstücke mit dem Stettiner Magistrat kurz vorher abgeschlossen hatte, begann zu jener Zeit die Stadt mit der Ausführung der großartigen Anlage der später nach dem Oberbürgermeister Haken benannten Terrasse an der Oder und mit der Herstellung des Straßennetzes auf dem Gelände des ehemaligen Forts Leopold, um dies baulich aufzuschließen. Während dabei die Straßenflächen in das städtische Eigentum übergingen, nahm das Reich durch die dazu eingesetzte Kommission die Verwertung des in seinem Besitze verbleibenden Baulandes in die Hand.

Die Bebauung der Oderfront auf der Hakenterrasse erforderte Monumentalbauten, und so begegneten sich alle Wünsche, als, dem Berichte des Regierungspräsidenten entsprechend, auf den Bauplatz an dieser Terrasse staatlich Beschlag gelegt wurde (Text-Abb. 4). Der Staat gewann einen seiner Lage nach geeigneten Bauplatz, das Reich einen willkommenen Abnehmer und die Stadt die Aussicht auf einen besonders stattlichen Bau an einem ihrer bedeutsamsten Punkte.

Inzwischen hatte sich noch die Notwendigkeit herausgestellt, für eine Anzahl kleinerer, mit der Regierung in Zusammenhang stehender Behörden (Wasserbauinspektion, Hafenpolizeiamt, Lotsenamt, Seeamt und Seemannsamt) geeignete Diensträume durch einen Neubau zu beschaffen. In den Zentralbehörden wurde es für geboten erachtet, diesen Neubau mit dem der Regierung und dem eines Dienstwohngebäudes für den Regierungspräsidenten zu verbinden.

Auf der Grundlage von Bauprogrammen, die demnächst bei der Regierung aufgestellt wurden, entstand in den Jahren 1903 und 1904 unter Leitung des inzwischen verstorbenen

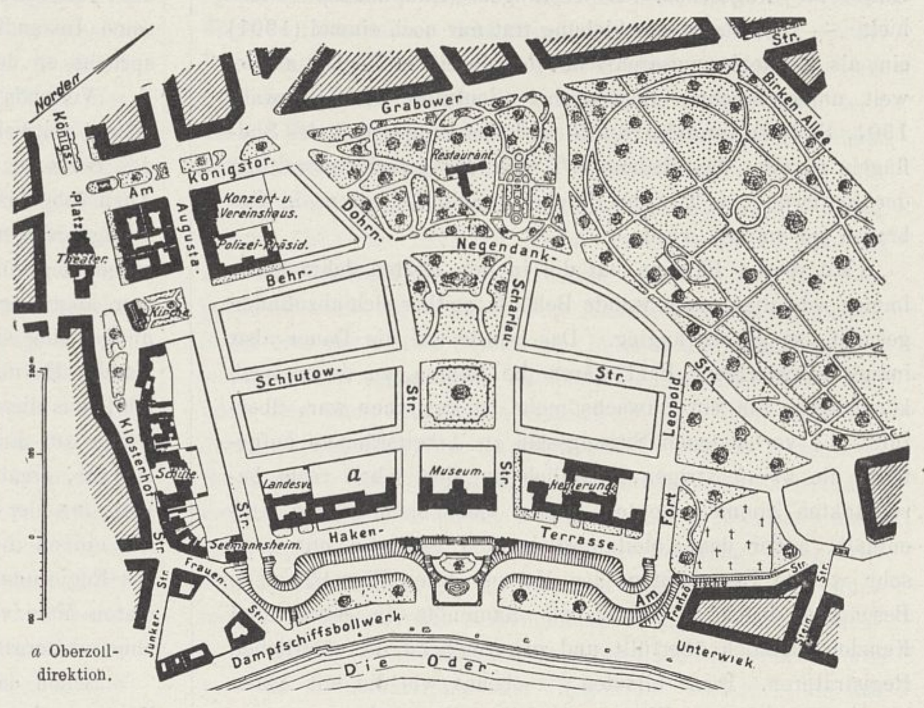


Abb. 4. Lageplan.

Geheimen Oberbaurats Kieschke im Ministerium der öffentlichen Arbeiten der Vorentwurf für die gesamte Bauanlage.



Abb. 5. Wohnhaus des Regierungspräsidenten.

Die erste Baurate wurde in den Staatshaushaltetat von 1905 eingestellt, und im Sommer desselben Jahres wurde der ausführliche Entwurf, der übrigens im Verlaufe der Bauausführung noch ebenso zahlreiche wie durchgreifende Umarbeitungen erfuhr, und der Kostenanschlag durch den der Regierung überwiesenen damaligen Landbauinspektor Lehmgrübner mit Unterstüzung der ihm beigegebenen Hilfskräfte ausgearbeitet.

Mit der künstlichen Gründung und mit den dazu erforderlichen Erdarbeiten wurde im Frühjahr 1906 begonnen. Die Schwierigkeiten, die sich dabei einstellten, übertrafen nach Art und Umfang weit die Erwartungen.

Der trapezförmige Bauplatz, der mit den ihn umgebenden Straßen jetzt nach seiner Einebnung von Osten nach Westen abfällt und 12860 qm groß ist, hatte damals noch eine völlig zerklüftete Oberfläche; er wurde durch zahlreiche tiefe Gräben, durch mächtige Mauern und Wälle — die Überbleibsel der ehemaligen Befestigungswerke -- durchzogen. Die Wälle erhoben sich mit ihrer Krone bis zu 17 m über der Sohle der Gräben. Die Untersuchungen ergaben, daß das Erdreich auf dem größten Teil des Geländes aus aufgeschüttetem Boden bestand. Die Schüttungen waren von sehr verschiedener Beschaffenheit und bestanden bald aus feinem lockeren Sand, bald aus lehmhaltigem Erdreich. Dies war durch jahrhundertlange Lagerung und den Druck der darüber liegenden Bodenmassen derart zusammengepreßt, daß es von gewachsenem Boden kaum unterschieden werden konnte. Die vorgefundenen, außerordentlich wechselnden und unregelmäßigen Bodenverhältnisse machten die regelrechte Durchführung einer planmäßigen Gründung zur Unmöglichkeit, nötigten vielmehr dazu, den Sprüngen und außerordentlich starken Unterschieden in der Tiefenlage des brauchbaren Grundes mit den Grundmauern in stufenförmigen Absätzen zu folgen und sich anzuschmiegen. Nur an wenigen Stellen war es dabei möglich, mit dem Fundamente gewachsene Bodenschichten zu erreichen. Der weitaus größte Teil des Gebäudes mußte, da solche Schichten unerreichbar waren, entweder mittels vollständig durchgehender, 0,80 bis 1,20 m starker Betonplatten mit eingelegten Rosten aus Eisenträgern auf den lockereren Sandboden oder über gehörig verbreiterten Banketten auf die fester zusammengepreßten Lehmschichten gesetzt werden. Hierbei wurde durch andauernd fortgesetzte Belastungsproben die Tragfähigkeit der beanspruchten Erdschichten festgestellt und danach die Breite der Fundamentsohlen derart bestimmt, daß der Erdboden nicht stärker als mit 1,50 bis 2 kg/qcm belastet wurde.

Besondere Schwierigkeiten stellten sich in der Mitte der Ostfront ein. Unter den Sand- und Lehmschichten wurde dort in einer Tiefe von nur etwa 3,60 m über dem Oderspiegel (rd. 15 m unter der Straßenkrone) eine Fläche moorigen Wiesenbodens entdeckt, die keilförmig und in beträchtlicher Ausdehnung in die Baustelle hineingriff; offenbar die versumpfte Sohle eines der tiefen Seitentäler, die die ursprünglichen hohen Lehmwände des westlichen Oderufers zahlreich durchfurchten. — Tief in der Erde fanden sich noch die Stümpfe der Erlen vor, die einst hier in dichten Beständen das Ufer des Stromes besäumten. Die Entdeckung war um so mißlicher, als gerade an dieser Stelle über dem unzuverlässigen Untergrund sich der nördliche Turm (der sogenannte Schiffahrtturm) erheben sollte. Von einer Gründung auf hölzernem Pfahlrost, wie sie zuerst ins Auge gefaßt wurde, mußte abgesehen werden, weil das zuvor noch Erdausschachtungen von unverhältnismäßig großem Umfange erforderlich gemacht haben würde. Die demnächst geplante Ausführung einer Betonpfahlgründung scheiterte an den unerschwinglichen Forderungen, die die Unternehmer nament-

lich infolge der Unzugänglichkeit der Gründungsstelle stellten. Es wurde daher nicht ohne Besorgnis gewagt, den Moorboden unberührt zu lassen, ihn mit einer Kiesschüttung zu überdecken und die Gebäudeteile darüber auf Betonplatten mit starken Rosten aus eisernen Trägern zu gründen. Der Turm hatte seine Lage ungefähr in der Mitte des Moorgrundes. Die Kiesschüttung erhielt hier eine Höhe von 4 m mit abgeböschten Seiten; die 1,60 m hohe eisenbewehrte Betonplatte des Turmes wurde so breit angenommen, daß die Oberfläche der Schüttung nur mit 1,75 kg/qcm, ihre Sohle mit 1,20 kg/qcm Druck beansprucht wurde. Nach Süden und Westen hin wurden die Schüttungen bei wagerechter Oberfläche, den besseren Bodenverhältnissen folgend, staffelförmig allmählich schwächer ausgeführt. Zur Schüttung wurde der vortreffliche und scharfkörnige Kies von Hohensaathen (Oder) verwendet, in Schichten von 25 cm Höhe eingebracht und bei ständigem Annässen nach verschiedentlichen Versuchen mit Walzen von 1500 kg gleichmäßig gewalzt. Die in dieser Weise einfach und verhältnismäßig wohlfeil hergestellte Gründung hat sich als durchaus zuverlässig bewährt. Nur einmal haben im weiteren Verlaufe der Bauausführung an der Grenze der Kiesschüttung sich Risse in der Ostfront und in ihren Grundmauern gebildet, die aber ohne erhebliche Schwierigkeiten ausgeheilt werden konnten und seither nicht wieder aufgetreten sind.

Das tief zerklüftete alte Festungsgelände der Baustelle zwang dazu, die Ausführung der umfangreichen Gründungsarbeiten in eine größere Anzahl verhältnismäßig kleiner Einzelbetriebe zu zerlegen, weil die Bewegung der großen Erdmassen hauptsächlich auf die tiefen Gräben angewiesen war, die dazu als Wege dienen und frei gehalten werden mußten. Die das Gelände durchziehenden mächtigen alten Festungsmauern mußten, soweit sie innerhalb der Grundflächen des künftigen Gebäudes lagen, durch Sprengung vollständig beseitigt werden. So gewährte während der Dauer der Gründungsarbeiten die Baustelle mit ihrem Gewirr von hoch aufgetürmten Erdmassen, tiefen Ausschachtungen, zersprengten Mauerresten und neu angelegten, eingeschalten Fundamentteilen, fast den Anblick eines Bergwerkes mit Tagebetrieb, und der Arbeitsbetrieb bildete ein Schauspiel, das das Publikum anzog, für die Bauleitung dagegen weniger erfreulich war.

Die Grundmauern wurden bis zur Höhe der Kellersohle aus Stampfbeton hergestellt. Sie erreichten größtenteils eine beträchtliche Höhe (bis zu 10 m) und wurden

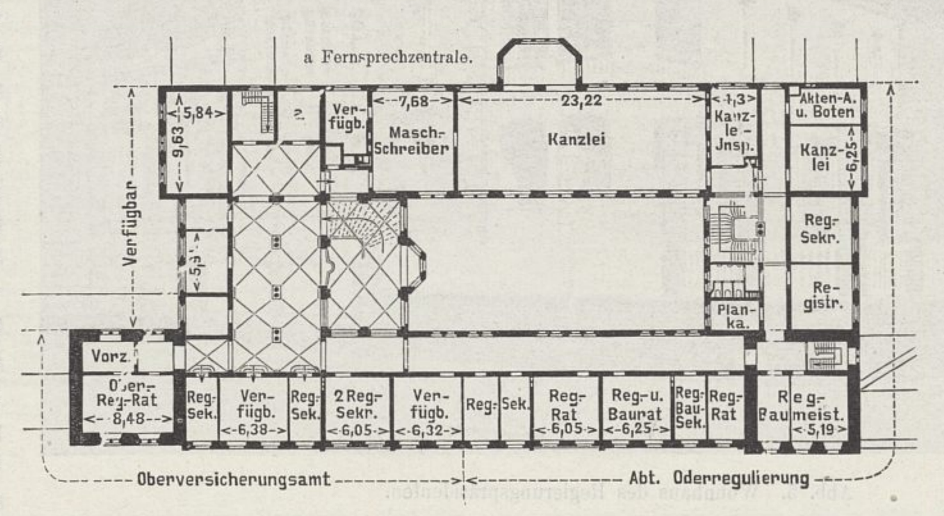


Abb. 6. Drittes Stockwerk.

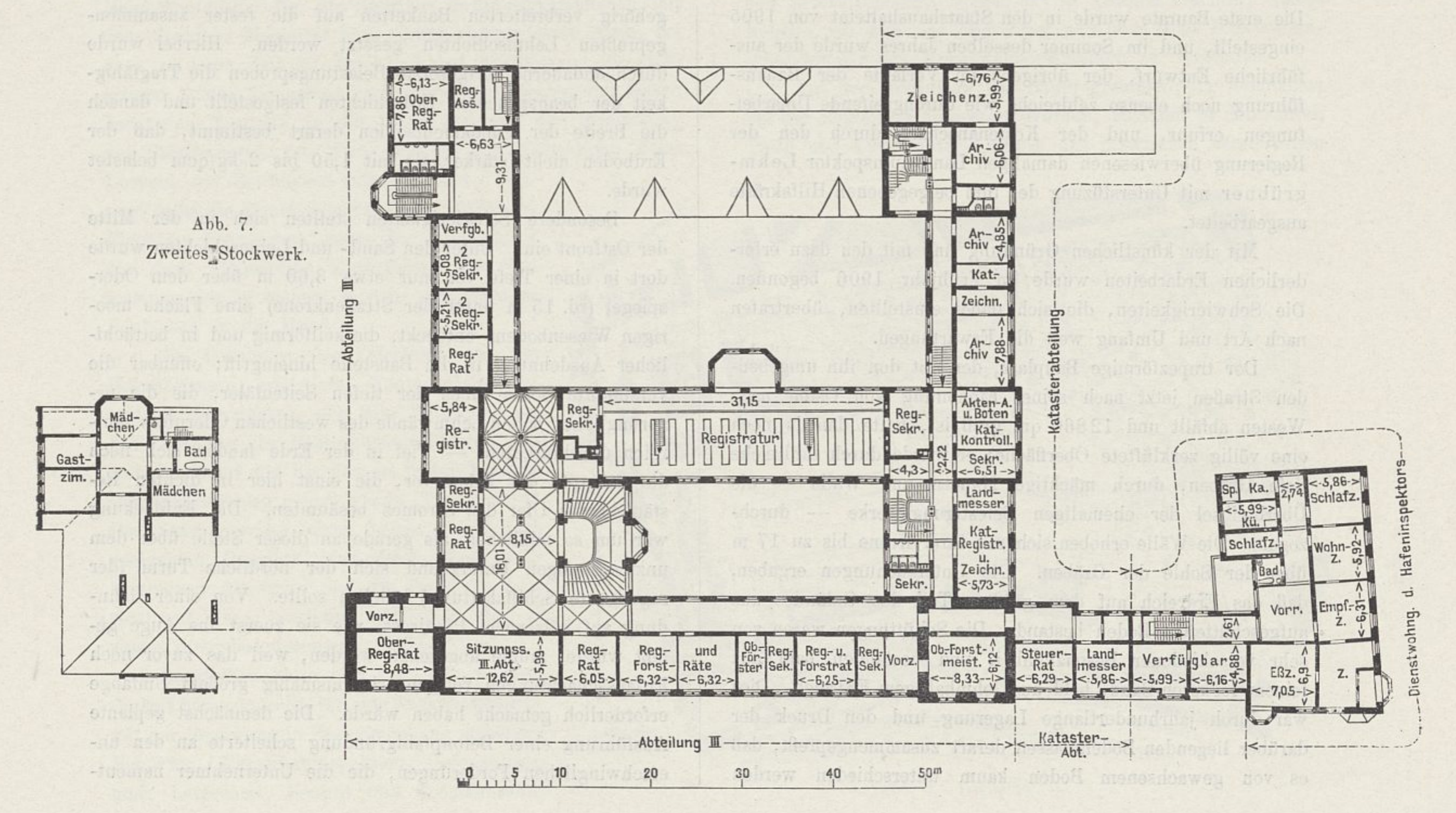


Abb. 7. Zweites Stockwerk.

der Ersparnis halber und der Achsenteilung des Gebäudes entsprechend über durchgehenden Banketten mit größeren Durchbrechungen angelegt, die mit eisenbewehrten Betonbalken überdeckt wurden. Die unter den beiden Türmen und unter der großen Haupthalle liegenden Teile der Gründung wurden nach ihrer Fertigstellung von der Verschüttung, wie sie bei

Abb. 8.
Erstes Stockwerk.

a Regierungsbaumeister.

Abb. 9.
Erdgeschoß.

den übrigen Teilen erfolgte, ausgeschlossen, mit böhmischen Kappen überwölbt und durch einfache Treppen zugänglich gemacht. Sie bilden verließartige, dunkle Räume von beträchtlicher Ausdehnung und Höhe und gewähren einen anschaulichen Begriff der Summe von Arbeit und auch von Geldmitteln, die hier unter dem aufstrebenden Gebäude im Erdboden verborgen ist.

Die Bauanlage (Text-Abb. 9) gliedert sich mit ihrer an der Hakenterrasse nach der Oder hin gelegenen Hauptfront in drei Gruppen. Den mittleren Hauptteil nimmt das Dienstgebäude der Regierung ein, südlich schließt sich hieran, mit dem

Der Haupteingang für die Regierung befindet sich an der Ostfront; an der Westfront liegen zwei weitere Eingänge, die vornehmlich für die Hauptkasse und den Bezirksausschuß bestimmt sind. Sie sind so angelegt, daß der Verkehr des Publikums bei dem zeitweise sehr starken Andrange zur Kasse sich nur in einer Richtung bewegt und die übrigen Flure und Diensträume nicht berührt. — Zu den Höfen führen zwei Durchfahrten, eine in der Ostfront zu dem östlichen, die zweite im Nordflügel zum westlichen Hof. Das Untergeschoß enthält außer zahlreichen Nebenräumen sechs Dienstwohnungen für Unterbeamte, im Mittelflügel die Räume für

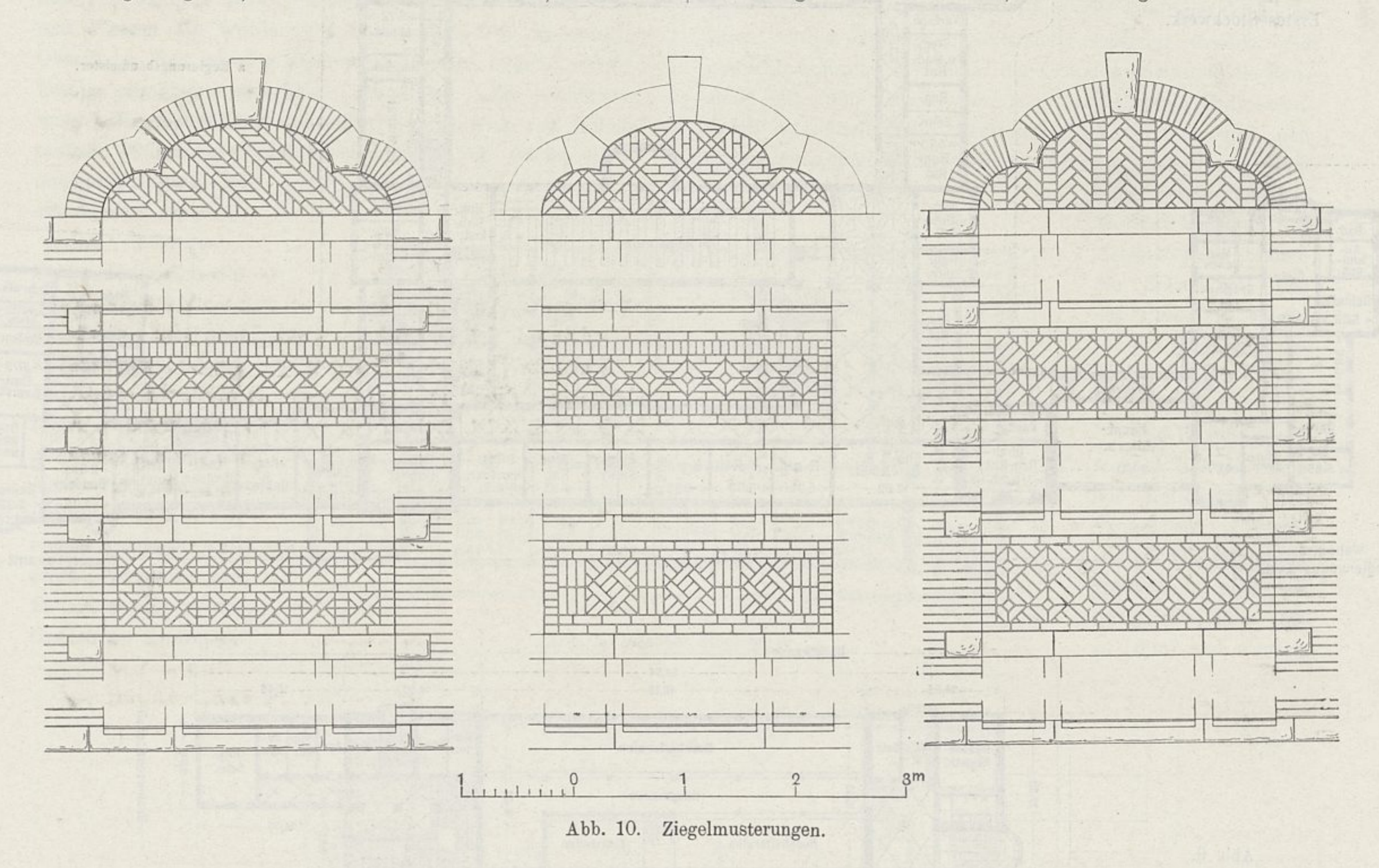


Abb. 10. Ziegelmusterungen.

Hauptgebäude durch den Zwischenbau des Hauptsitzungssaales verbunden, das Wohngebäude des Regierungspräsidenten, nördlich das Gebäude für die Schiffahrtbehörden an, dieses zwar als besonderer Flügel, doch ohne äußerlich erkennbare Abgrenzung. Das Dienstgebäude der Regierung umschließt zwei Höfe. Der Teil um den vorderen (östlichen) Hof enthält außer einem durchweg über der Erdoberfläche liegenden, überdies noch vollständig unterkellerten Untergeschoß von 3,30 m Höhe ein Erdgeschoß von 4,60 m und drei Obergeschosse von 4,60, 4,40 und 4 m Höhe. Der Abdachung des Baugeländes von Südosten nach Nordwesten folgend, liegen die um den hinteren (westlichen) Hof gruppierten Flügel des Gebäudes mit den Fußböden ihrer Geschosse durchweg 2,30 m unter denen des östlichen Teiles. Der Höhenunterschied wird durch Stufen in den Fluren des nördlichen und südlichen Querflügels vermittelt. Die am westlichen Hofe liegenden Nord- und Südflügel haben nur zwei Stockwerke über dem Erdgeschoß, der Westflügel nur eins (Blatt 4).

die Heizung, die bis zur Kellersohle hinabreichen; im Westflügel unter dem Kassensaal ein Archiv für ältere Aktenbestände, sowie die mit der Hauptkasse im Erdgeschoß verbundene, aus einem Vorraum, dem Depositenraum und dem Hauptraum für die Barbestände bestehende Tresoranlage. Mit ihrer Verlegung in das Untergeschoß ist von der sonst bei größeren Regierungsneubauten üblich gewesenen Lage neben dem Kassensaale zum ersten Male abgewichen worden. Dank dieser im Verlaufe der Entwurfdurcharbeitung vorgenommenen Änderung hat der dreischiffige Kassensaal im Erdgeschoß (40,18 m lang, 15,35 m breit) einen besonders hohen Grad von Übersichtlichkeit gewonnen.

Im Erdgeschoß sind, wie der Grundriß Text-Abb. 9 zeigt, die Diensträume der Abteilung für Kirchen- und Schulwesen, das Arbeitszimmer des Präsidenten nebst dem Präsidialbureau und dem Hauptsitzungssaal, ferner der Bezirksausschuß und die Hauptkasse untergebracht. Die Lage dieser beiden Behörden im Erdgeschoß war durch die Rücksicht auf das bei ihnen zahlreich verkehrende Publikum vorweg gegeben.

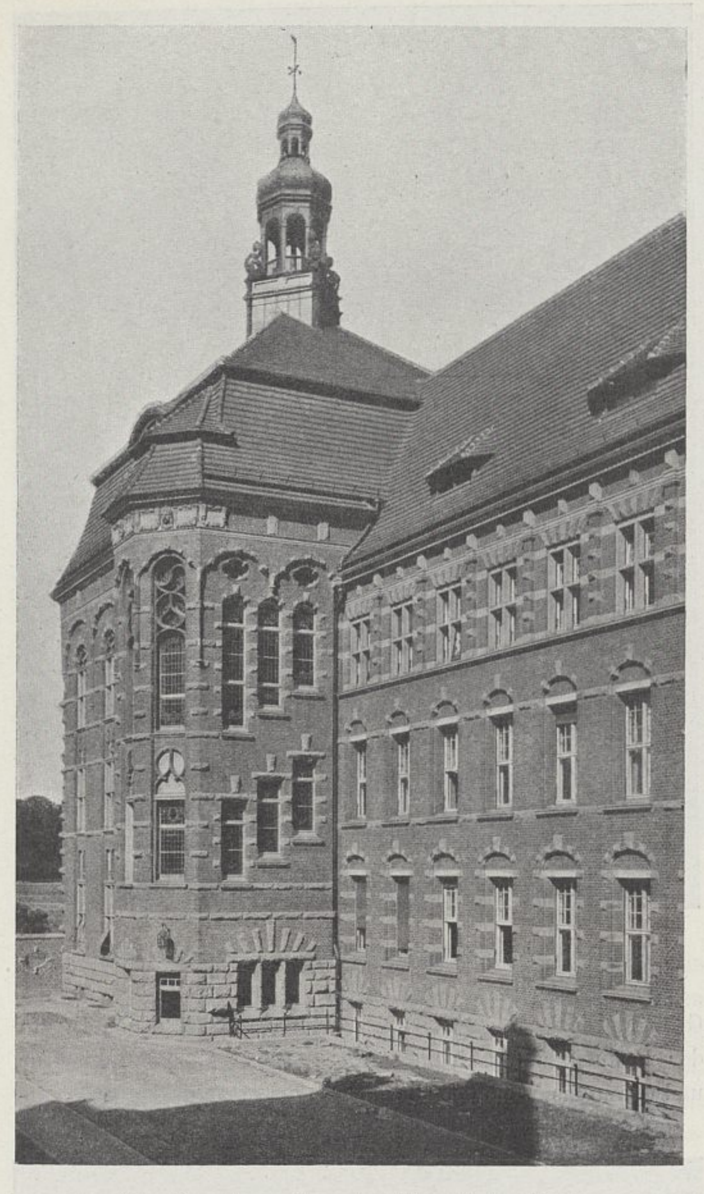


Abb. 11. Treppenhaus im südwestlichen Eckbau.

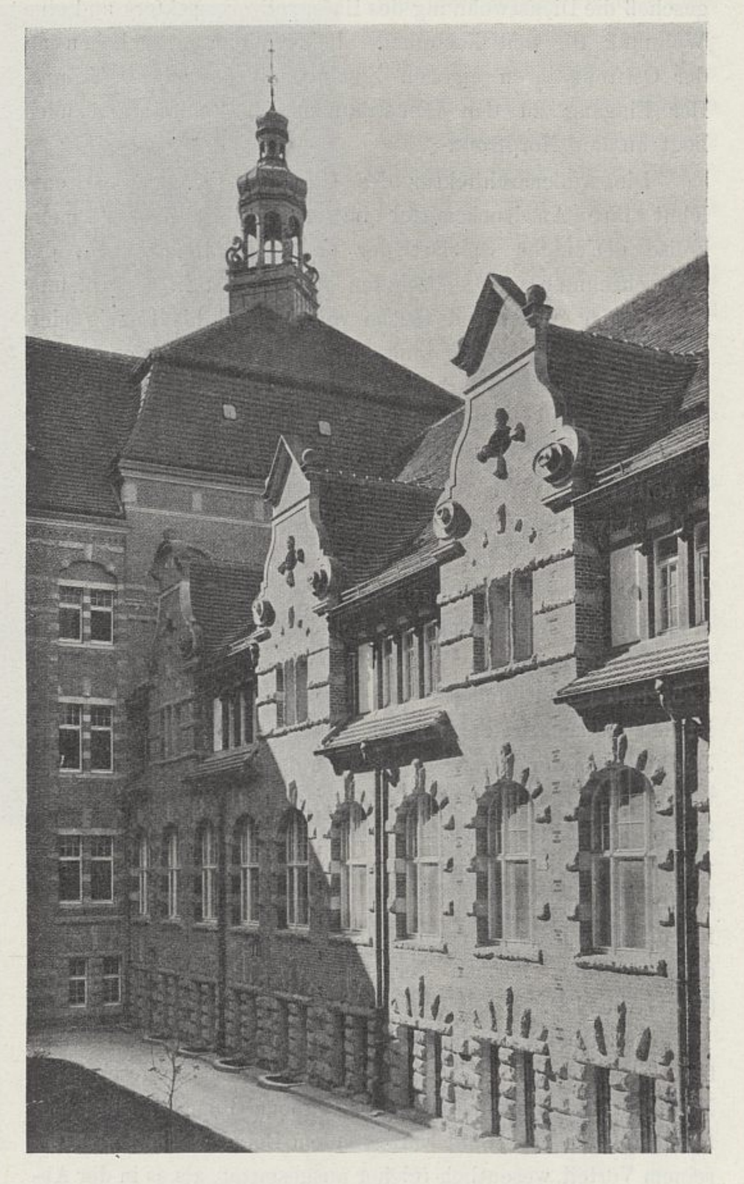


Abb. 12. Kassenflügel im westlichen Hofe.

Da beide dort aber einen erheblichen Teil des verfügbaren Raumes in Anspruch nehmen, blieb für die Präsidialabteilung, der aus dienstlichen Gründen wohl sonst der Vorzug der Erdgeschoßlage in erster Reihe zustand, infolge ihres größeren Raumbedarfes nicht mehr genügender Platz übrig; sie mußte gegen die weniger umfangreiche Kirchen- und Schulabteilung zurücktreten und in das erste Stockwerk (Text-Abb. 8) verwiesen werden. Dies enthält außer ihren Diensträumen noch einen für die Präsidial- und für die Kirchen- und Schulabteilung gemeinschaftlichen Sitzungssaal an der Ostfront und im Nordflügel die aus einem Lesezimmer, einem Vorraum und einem vierfenstrigen Speicherraum bestehende Bibliothek.

Das zweite und das dritte Stockwerk (Text-Abb. 6 u. 7) sind in ihrer Flächenausdehnung auf die Flügel um den östlichen Hof beschränkt. Das zweite enthält die Abteilung für direkte Steuern, Domänen und Forsten und mit ihr die räumlich sehr ausgedehnte Katasterverwaltung; im dritten ist die Abteilung für die Oderregulierung und neuerdings noch das Ober-Versicherungsamt untergebracht, das dabei aber den im Erdgeschoß belegenen Sitzungssaal des Bezirksausschusses mitbenutzen muß.

Die Registraturen aller drei Abteilungen der Regierung nehmen den zwischen den beiden Höfen liegenden Mittelflügel vom Erdgeschoß bis zum zweiten Stockwerke ein. Darüber liegt im dritten Stockwerke die Kanzlei.

Für das Wohngebäude des Regierungspräsidenten wurde durch die Loslösung von dem Dienstgebäude die Möglichkeit einer freieren Raumanordnung geschaffen. Die Bauanlage schließt sich damit dem auch bei anderen neueren Regierungsgebäuden (Potsdam, Minden, Koblenz) bewährten Plan an. Das Wohngebäude erhielt das Gepräge eines vornehmeren Landhauses; seine Gesellschafts-, Wohn- und Schlafräume gruppieren sich im Erdgeschoß und ersten Stockwerke um eine geräumige Diele (Text-Abb. 8 u. 9). Die Lage des Sitzungssaales ermöglicht dem Regierungspräsidenten seine Mitbenutzung bei Festlichkeiten. Im Sockelgeschoß befinden sich die Wirtschaftsräume und eine Dienerwohnung. Das teilweise ausgebaute Dachgeschoß enthält einige Gastzimmer und Mädchenkammern (Text-Abb. 7).

Im Schiffahrtgebäude werden Untergeschoß und Erdgeschoß von dem Seemannsamt, dem Lotsenamt und der Hafenpolizei eingenommen. Im ersten Stockwerk befindet sich das Wasserbauamt, im zweiten und im ausgebauten Dach-

geschoß die Dienstwohnung des Hafenpolizeiinspektors und eine Wohnung für den Kastellan. Beide Wohnungen haben an der Ostfront ihren eigenen Zugang mit besonderer Treppe. Der Eingang zu den Diensträumen des Schiffahrtgebäudes liegt an der Nordfront.

Die Außenarchitektur des Gebäudes (Bl. 1 bis 3) entlehnt ihre Ausdrucksmittel im allgemeinen dem Formenkreise derjenigen Spielart der deutschen Renaissance, die im sechzehnten und siebzehnten Jahrhundert in den Küstenländern der Nord- und Ostsee von Holland bis Danzig sich zur Blüte entwickelte und in ausgeprägter Eigenart mit der roten Backsteinverblendung der glatten Flächen (Text-Abb. 10) eine mehr oder weniger reiche Ausbildung der Gliederungen, Architekturteile und des zierenden Beiwerkes in hellfarbigem Werkstein vereinte. Eine streng geschichtliche Anwendung des Formenschatzes dieser Kunstepoche wurde jedoch nicht angestrebt. Die östlichen Bauteile erhielten unter Bevorzugung des Werksteins im allgemeinen eine reichere Ausbildung, sie schließen sich dabei mehr an die lebhaft bewegten Einzelformen der späteren Zeit des siebzehnten Jahrhunderts an. Für die westlichen Bauteile ist den einfacheren Formen der früheren Zeit des sechzehnten Jahrhunderts der Vorzug gegeben, in der der Backstein stärker überwiegt. Beide Gruppen ließen sich jedoch durch gleichartige Behandlung einzelner Ausdrucksmittel (Fenster, Quaderungen u. a. m.) auf einen gemeinsamen Grundton zusammenstimmen. Auch an den westlichen Bauteilen wurden übrigens für einzelne bedeutsamere Architekturteile, z. B. die Portale der Westfront, Formen der späteren Barockzeit zugelassen (Text-Abb. 13).

Bis zu beträchtlicher Höhe (Hauptgesims 21,40 m, Dachfirst 32 m) erhebt sich an der Ostfront der fünfgeschossige Mittelbau des Hauptgebäudes über dem Gelände, in seiner fensterreichen Front mit verzierendem Beiwerk wohl nicht zu seinem Vorteil wesentlich reicher ausgestattet, als es in der Absicht des ursprünglichen Vorentwurfes lag (Abb. 1 Bl. 2 u. 3). Der Südteil des Mittelbaues ist durch die noch reichere Ausbildung der Fensterarchitektur der Abteilungssitzungssäle und darunter durch eine dreiachsige, von Rustika-Doppelsäulen getragene Vorhalle besonders ausgezeichnet (Bl. 5). Die Vorhalle überdacht das Hauptportal und trägt an ihrer Balustrade in ausdrucksvoll gehaltenem Wappenschilde den in Bronze getriebenen, heraldischen preußischen Adler. Die Höhenwirkung des Mittelbaues wird durch drei stattliche Giebel von besonders verschwenderischem Formenreichtum weiterhin auf das nachdrücklichste gesteigert und gipfelt in den beiden Türmen, die ihn nördlich und südlich flankieren: beide von kupfergedeckten Hauben überragt und in Höhe und Umrißlinie ungleich gestaltet. Der nördliche, stumpf abgeschlossene sog. Schiffahrtturm, unterhalb seines Daches von einer frei vorkragenden Säulengalerie umzogen, trägt eine von der Reichspostverwaltung betriebene Zeitballanlage, die den Zwecken der den Stettiner Hafen anlaufenden Schiffe zu dienen bestimmt ist und ihre Ausführung hauptsächlich persönlicher Anordnung Seiner Majestät des Kaisers und Königs, beiläufig zum Teil auch einem Beitrage der Stadt Stettin und ihrer Kaufmannschaft verdankt. Der südliche Turm entwickelt seine durchbrochene schlanke Spitze aus dem Achteck zwischen vier begleitenden Ecktürmen bis zu der Höhe von 71 m über



Abb. 13. Eingang zur Regierungshauptkasse (Westflügel).

Gelände (Text-Abb. 17). — Nach Süden schließt sich an ihn der Hauptsitzungssaal mit seiner reichen Fensterarchitektur und daran das Wohngebäude des Regierungspräsidenten (Text-



Abb. 14. Treppe im nordwestlichen Eckbau.

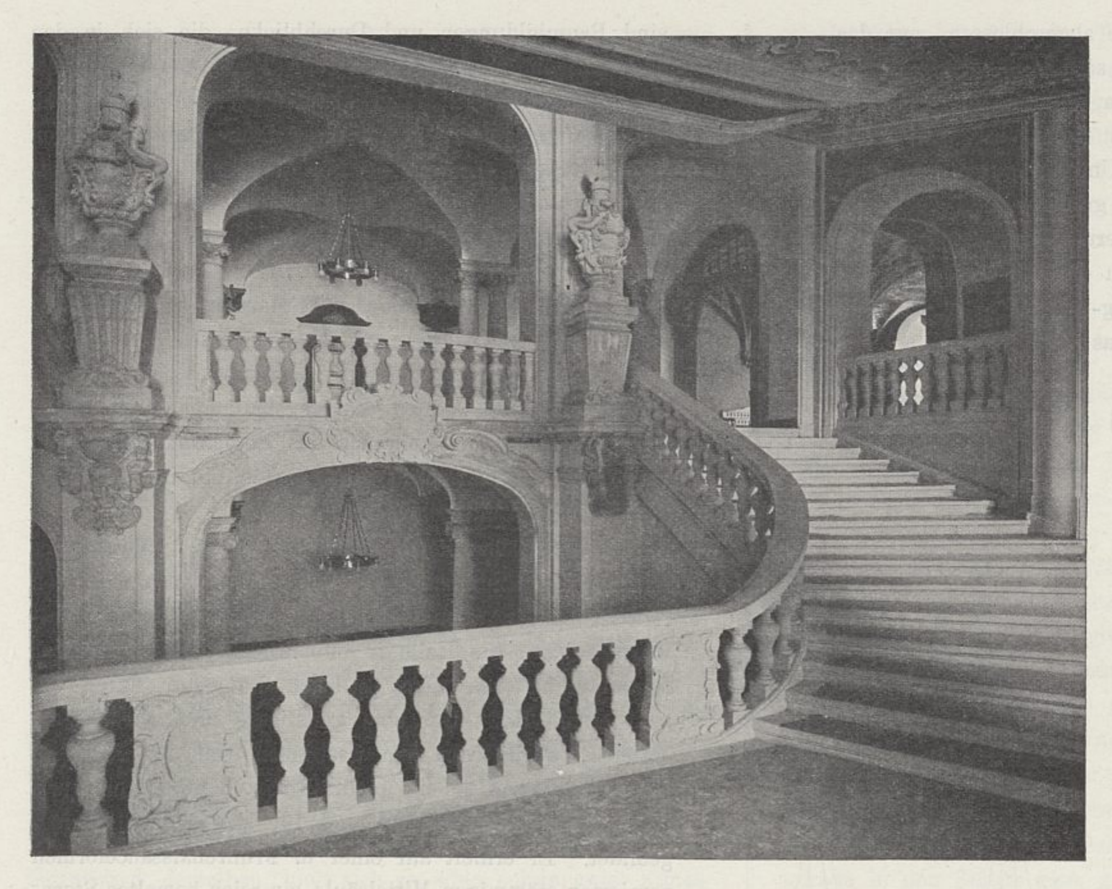


Abb. 15. Haupttreppe.

Abb. 5), das seine besondere Zweckbestimmung durch die beiden an der Südostecke übereinander angeordneten offenen Hauslauben, durch wohnliche, aussichtsreiche Erker, reich durchgebildete Giebel und ein besonders hohes Dach deutlich zum Ausdruck bringt. — Nach Norden stuft die Ostfront sich zu einem viergeschossigen Flügel ab, der das Dekorative ihrer Gesamtwirkung sogar durch Motive des Fachwerkbaues erhöht und in dem reichen, mit mehreren Erkern ausgezeichneten Giebel des Schiffahrtgebäudes (Text-Abb. 3 u. Abb. 1 Bl. 1) einen ausdrucksvollen Abschluß findet.

Im Vergleich zu der derart stark gegliederten Ostfront sind die westlichen Bauteile (Abb. 2 Bl. 2 u. 3) in ihrer architektonischen Ausbildung, wie schon bemerkt, erheblich schlichter gehalten. Doch auch bei ihnen ergeben sich durch die Verteilung der Gebäudemassen, sowie durch den Wechsel in der Zahl der Stockwerke und in den Höfen bei den einzelnen Flügeln, wie sie infolge der Grundrißgestaltung entstehen, überall ausgesprochen malerische Gruppierungen und Umrißlinien von ungewöhnlich lebhafter Bewegung. An der gleichartig gestalteten Nord- und Südfront treten hauptsächlich die den Registraturflügel beiderseits abschließenden hohen Mittelrisalite mit hochragenden Giebeln und ihren durch mehrere Stockwerke hindurch mit Wandstreifen zusammengefaßten Fenstern bedeutsam hervor. Die Südseite ist durch den in gotisierenden Formen gehaltenen, an den Eckbau sich anlehnenden Treppenausbau besonders ausgezeichnet (Text-Abb. 11 u. Abb. 2 Bl. 1).

Auch in den Höfen wurde, wenn auch mit einfacheren Mitteln und geringerem Aufwande, danach gestrebt, die innere Zweckbestimmung der einzelnen, die Höfe umgebenden Bauteile äußerlich klar und architektonisch wirksam zum Ausdruck zu bringen. Insbesondere gilt dies von dem mittleren Registraturflügel, dessen im östlichen Hof liegende Front die inneren Halbgeschosse vom Erdgeschoß bis zum zweiten Stockwerk in der Fensterarchitektur auch außen in ganzer Höhe einheitlich zusammengefaßt zeigt. Im westlichen Hof hingegen sind die Fenster der Registratur in voller Stockwerkhöhe durchgenommen, weil hier die halben Geschoßteilungen nicht durchgeführt sind. Eine besonders lebhafte Gliederung hat in diesem Hofe das Dach des Kassenflügels erhalten. Das Ostschiff des im Erdgeschoß liegenden Kassensaales sollte dort



Abb. 16. Haupthalle und Haupttreppe im Erdgeschoß.

ursprünglich mit flachem Dache abgeschlossen, nur das Westschiff und der Mittelgang sollten im ersten Stockwerk überbaut werden. Schon während der Bauzeit aber stellte sich ein Bedürfnis nach Vermehrung der Diensträume, namentlich zur Unterbringung der Referendare heraus, die damals in größerer Zahl zur Ausbildung an der Stettiner Regierung zusammengezogen wurden. Solche Räume wurden durch Überbauung des Ostschiffes des Kassensaales zwanglos gewonnen. Dazu wurde das

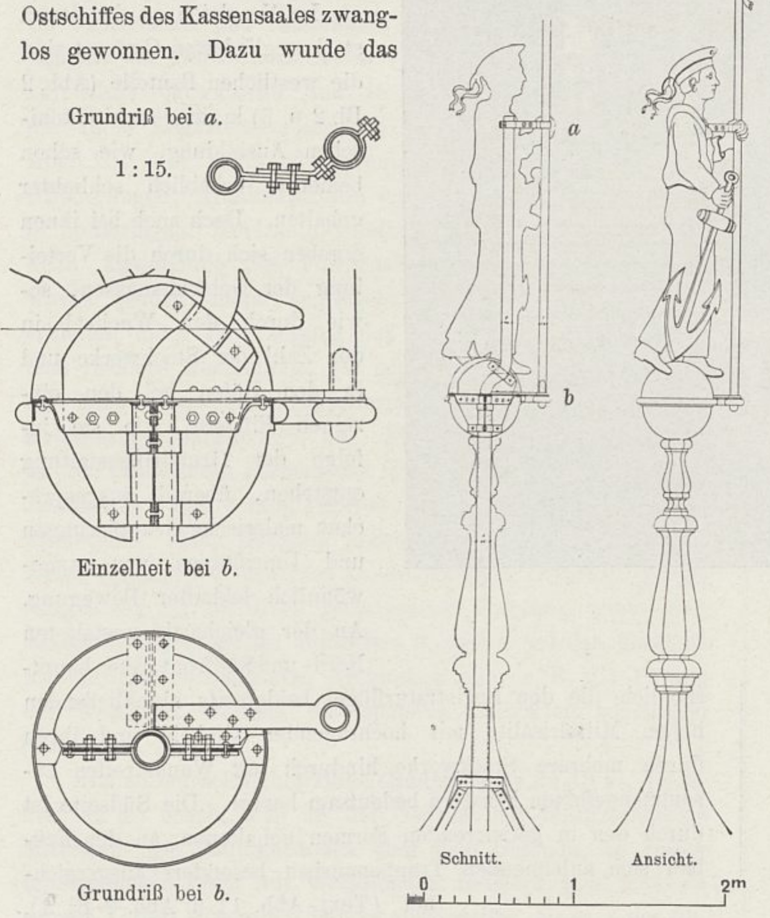


Abb. 17. Bekrönung des südlichen Turmes.

Dach über dem ersten Stockwerk als Schleppdach heruntergezogen, durch massive Giebel und dazwischenliegende Fenstergruppen in Fachwerk durchbrochen und das Dachgeschoß dahinter ausgebaut (Text-Abb. 12 u. Bl. 4). Es ergab sich nicht nur der gewünschte Raumzuwachs, sondern mit ihm auch eine offenbare bauliche Verbesserung und ein schätzbarer architektonischer Gewinn für das Gebäude. Die Kassenfront am Westhofe ist ohne Frage einer seiner ansprechendsten Teile.

Im Innern sind Diensträume und Flure in durchaus schlichter Weise behandelt. Die mit heller Kaseinfarbe gestrichenen Wandflächen der Flure werden belebt durch die tiefen Türnischen, die mit ihren Umrahmungen und dem Holzwerk der Türen in kräftigen Farben getönt sind. Die Umrahmungen der in den Diensträumen durchweg in Blendrahmen ausgeführten, nach innen aufschlagenden Türen sind in den Hauptfluren und Hallen des Ostteiles mit abwechselnden Gliederungen aus Hartputz und mit schräg nach außen geöffneten Leibungen hergestellt, die mit barocken Rankenmustern in hellen Farbentönen bemalt sind. In den westlichen Bauteilen sind die Türen schlichter behandelt und nur mit abgerundeten Leibungen umzogen. Von einigem Reize sind Raumbildungen und Durchblicke, die sich in den hallenartigen Erweiterungen der Flure der nordwestlichen und südwestlichen Eckbauten (Text-Abb. 14) durch die hier gelegenen, gegen diese Räume sich öffnenden Treppen ergeben. — Für die Vorhalle des Haupteinganges an der Ostfront ist, der Würde des Gebäudes entsprechend, eine etwas reichere Behandlung aufgewendet. Die Wandflächen und Aufgangsstufen sind mit Marmor in verschiedenen Farben bekleidet, das korbbogenförmige Tonnengewölbe hat eine kassettierte Stuckdecke (vgl. Schnitt Bl. 4). Bei den beiden Eingangshallen an der Westfront und der zur Wohnung des Regierungspräsidenten sind Wände und Decken ausschließlich in Stuck durchgebildet und weiß gestrichen.

Eine durchgreifende Änderung erfuhr während der Bauzeit die Haupthalle mit der an sie anschließenden Haupttreppe in allen Geschossen. In dem ersten Entwurfe reichte die Halle in einheitlicher, langgestreckter Raumbildung von dem östlichen Längsflur durch bis zum ersten Hof. Um eine günstigere Raumwirkung zu erzielen, wurde von dem westlichen Teil der Halle in allen Geschossen je ein quadratischer Raum durch Gurtbogenöffnungen abgetrennt und für sich gesondert ausgebildet. Er erhielt auf einer in Frührenaissanceformen verzierten stämmigen Mittelsäule ein reich bemaltes Sterngewölbe und ausgesprochen farbige Behandlung an den Wänden, während die verbleibende östliche Halle durch Säulenstellungen in klassizistischen Formen dreijochig geteilt und mit Kreuzgewölben überdeckt, farblos behandelt, im Erdgeschoß übrigens durch Tieferlegung des Fußbodens auch höher angelegt wurde, als der westliche Teil (Text-Abb. 16 u. Bl. 4). Die gesonderte Behandlung beider Hallenhälften wurde mit Hilfe von reich ausgebildeten Holzeinstellungen in den trennenden Gurtbogenöffnungen noch stärker hervorgehoben. Im Zusammenhang mit dieser Umgestaltung wurde auch an Stelle der in dem ursprünglichen Entwurf vorgesehenen dreiarmigen Haupttreppe, von der eine unvorteilhaft beengte Raumwirkung befürchtet wurde, zu einer einläufigen gewendelten Treppenanlage übergegangen, der dafür eine erheblich größere Laufbreite gegeben werden konnte (Text-Abb. 15). Der Haupttreppenraum wurde mit einem großen Netzgewölbe überspannt. Auch hier kam der Dekorationsmaler zu seinem Recht; die Decke und die Unteransichten der Treppenläufe zeigen in ihren ganzen Flächen helles Ranken- und Schnörkelwerk auf blauem Grunde und gewähren mit dem Reichtum dieser Malerei in dreifacher Wiederholung übereinander, von unten gesehen, ein Bild von überraschender Wirkung.

Ihr besonderes Augenmerk richtete die Bauleitung auf eine zweckmäßige, dabei aber ansprechende Ausgestaltung des großen Hauptkassenraumes. Um in ihm möglichste Übersichtlichkeit und Helligkeit zu erreichen, wurde die Zahl der Stützen unter den beiden Längsunterzügen gegen den Vorentwurf auf die Hälfte eingeschränkt; bei den damit erreichten Stützenabständen von nicht weniger als 6,70 m mußten an die Stelle der ursprünglich vorgesehenen Werksteinsäulen starke genietete Eisenstützen treten, die ebenso wie die schweren Kastenträger darüber mit Monierummantelung feuersicher geschützt wurden. Einheitlich mit der Decke

wurden die Unterzüge danach in Stuck gezogen, während die Stützen im Zusammenhang mit den ganzen für den Kassenbetrieb erforderlichen sonstigen Einbauten in Holzarchitektur ausgestaltet wurden. Nur die Zahlstellen, aber nicht die Buchhaltereien erhielten Schaltergitter oder verglaste Schranken über den Tischen. Decke und Wände sind hellgefärbt; reichere Bemalung mit weißem und grauem Ornament auf dem braunen Lasurton ist nur den Holzeinbauten und den holzbekleideten Stützen zuteil geworden und verleiht dem Raum eine vornehme Farbenwirkung. (Schluß folgt)

Baustoff und Farbe.

I.

Im Kampf der Meinungen über Ziele und Aufgaben der heutigen Kunst ertönt wohl am lautesten der Doppelruf nach „schlichter Form" und „echtem Material". Die Forderungen, die die beiden Schlagworte erheben, bedeuten eine gesunde Reaktion gegen die große Verwirrung, die eine wahllose Häufung geschichtlicher Stilformen und ihre unüberlegte Übertragung von einem Baustoff auf den andern angerichtet hatten, und sind in diesem Sinne voll berechtigt. Sie haben für die oft noch unsicher tastende Kunst unserer Zeit als äußere Richtpunkte einen entschieden erzieherischen Wert. Gleichwohl ist ihre Bedeutung nur bedingt, den Kern künstlerischen Schaffens berühren sie nicht.

Die große Masse der Bauschöpfungen, gleichsam der Grundstock derselben, hielt sich zu allen Zeiten guter Kunstübung in schlichten Formen, deren Umfang noch dazu durch eine fest überlieferte Richtschnur ziemlich eng umrissen war. Von diesem Grunde heben sich jedoch am Giebel der Fassade, im Richtpunkt der Straße, in der Mitte der Platzwand, im Festsaal des Hauses, Glanzpunkte reicher und reichster Formengestaltung als Perlen ab, und erst durch die besonnene Verteilung von leise und laut, schlicht und reich kam die künstlerische Wirkung voll zur Geltung. Im Wesen und in den Gesetzen dieser Zusammenstellung ruhen die künstlerischen Werte, nicht in der Schlichtheit oder dem Reichtum der Form, in der Beschaffenheit, der „Echtheit" oder dem „Adel" des Stoffes. Dem künstlerischen Gesetz gebührt die Herrschaft über den Stoff, nicht umgekehrt. In dieser Hinsicht wird die Bedeutung des Stoffes heute oft überschätzt. „Weil die Bedingungen des Materials den Künstler zwingen können, durch verschiedene Materialbehandlung den künstlerischen, vom Material gänzlich unabhängigen Bedürfnissen gerecht zu werden, leitet man die künstlerischen Prinzipien vom Material her und sieht in der künstlerischen Darstellung zuletzt nichts weiter als eine Darstellung des Materials und seiner Verarbeitung. Das ist denn doch eine sehr starke Verwechslung von Zweck und Mittel." [1])

Bei solchem Zur-Schau-Stellen des Stoffes wird vielfach grundsätzlich seine Färbung vermieden. Zum mindesten wird gefordert, daß die Oberfläche des Baustoffs (Holzmaserung, löcheriges Gefüge gewisser Gesteine usw.) möglichst unverdeckt zutage liegt, ja es wird mit dieser Oberflächenbeschaffenheit als mit einem wesentlichen künstlerischen Ausdrucksmittel gerechnet. Man stellt also statt bewußt geschaffener Formen und Farben Zufallswerte und Zufallsfarben nebeneinander, um künstlerische Wirkungen zu erreichen. Ein weitgetriebener Realismus.

Im folgenden soll versucht werden festzustellen, welche Aufgaben der Farbe in der Architektur zufallen, und wie weit bei den wichtigsten Baustoffen ihre natürliche oder künstliche Farbe geeignet ist, diesen Aufgaben zu genügen.

Im Grunde wird jeder Eindruck auf das Auge durch Farbe hervorgerufen. Die Fläche macht sich kenntlich durch ihre Farbe, die Linie erscheint als Grenze zweier Farbenflächen, die Modellierung gibt sich durch hell und dunkel, also durch Farben zu erkennen. Schon aus dieser einfachen Überlegung erhellt, welche gewaltige Rolle in aller Kunst, die wir durch das Auge aufnehmen, die Farbe spielt. Mögen nun die einzelnen Töne einer einfarbigen Stufenleiter (Schwarz-Weiß) oder einer vielfarbigen angehören.

Ein Blick auf die Geschichte zeigt denn auch, daß gerade in den Zeiten ganz großer, aus stetiger Entwicklung entsprossener Kunst, in der Antike und im Mittelalter, die Farbe, und zwar vornehmlich die gemalte Farbe, eine bedeutende, oft geradezu beherrschende Stellung in der Architektur und Plastik einnimmt. Auffallenderweise gehen unsere Kunstgeschichten über diesen wichtigen Gegenstand meist mit wenigen, gleichsam entschuldigenden Bemerkungen hinweg. So kommt es denn, daß trotz aller wissenschaftlichen Feststellungen in der Vorstellung der Gebildeten namentlich die antike Kunst heute immer noch als die einfarbige Kunst des schneeweißen oder allenfalls gelblichen Marmors lebt. Eine bisher noch ungeschriebene Geschichte der Farbe in der Architektur hätte beispielsweise die Zusammenhänge von Relief und Farbe aufzudecken und müßte zeigen, wie viele der uns überlieferten Formen, die uns als reine Plastik ganz unverständlich sind, erst durch die oft bis auf unkenntliche Reste verloren gegangene Bemalung Sinn und Bedeutung erhalten. „Wie sehr in der mittelalterlichen Skulptur Form und Farbe einander bedingen, geht", sagt Schäfer [2]) beispielsweise, „unter anderen daraus hervor, daß, je mehr in der beginnenden Spätzeit der Gotik die glatte Vergoldung der Kleidung überhandnimmt, um so mehr die weiche Faltenführung der geknitterten Platz macht. Die letztere ist meines Erachtens darauf berechnet, die Reflexe der Goldflächen zu vervielfachen und wäre in einer Zeit farbloser Skulptur wohl niemals aufgekommen." Leider war die Farbe meist weniger dauerhaft als der Stoff. Das zeigte sich, als in Italien die Aufmerksamkeit für die antike Kunst neu erwachte. Man übersah die geringen Farbenreste, die die antiken Skulpturen und Bauteile noch trugen, und warf mit den mittelalterlichen Formen auch die überkommene farbige Behandlung derselben über Bord, in der Meinung, damit im Sinne der antiken

---

1) A. Hildebrand, Das Problem der Form in der bildenden Kunst.

2) Carl Schäfer, Von deutscher Kunst. Gesammelte Aufsätze und nachgelassene Schriften.

Kunst zu verfahren. So scheint der Irrtum von der Einfarbigkeit der antiken Kunst in die Welt gekommen zu sein.

Ein durchaus einfarbiges Architekturgebilde, etwa ein durchaus einfarbiger Raum, ist theoretisch wohl denkbar. In ihm würden dann Gesamtverhältnisse und Reliefschatten die alleinigen Ausdrucksmittel sein, wenn man eine einheitliche und gleichmäßige Beleuchtung voraussetzt. Der Fall ist etwa bei einem einfarbigen, entsprechend beleuchteten Gipsmodell gegeben. Tatsächlich scheint ein derartiger Gedanke, als Ideal einer rein plastischen Richtung in der Baukunst, Florentiner Meistern wie Brunellesco vorgeschwebt zu haben. Praktisch durchführbar ist das Verfahren wohl für Werke der monumentalen Plastik, auch der Denkmalarchitektur, die der freien Natur etwa auf waldiger Höhe gegenüberstehen, wenn man sich damit abfindet, daß die wandernde Sonne die beabsichtigten Schattenwirkungen immer wieder verschiebt. Für Bauwerke, die der Benutzung von Menschen dienen, ist Einfarbigkeit nicht durchführbar. In der Tat hat denn auch die einseitig-plastische Richtung der Schöpfungen Florentiner Architekten eine gewisse Loslösung der zur Schau gestellten Einzelteile von der Gesamtheit des Bauwerks bewirkt, die der Kunst anderer Zeiten fremd ist. Die vor das Gebäude gestellten Prunkfassaden mit ihren gewaltig gesteigerten Gesimsausladungen tragen eher das Gepräge eines rein plastischen Denkmals und sind oft nur soweit verständlich, als sie für die Räume der Stadt, die Straßen und Plätze monumentale Wände bilden.

In Deutschland hat die geschichtliche Kunst nie auf das wirksame Ausdrucksmittel der Farbe verzichtet. Braucht doch gerade die Baukunst ihre Mittel am nötigsten, da sie von allen Künsten am wenigsten frei, vielmehr an die vielen Forderungen des praktischen Bedürfnisses und an die zur Verfügung stehenden Baustoffe eng gebunden ist, und wirkt doch gerade die Farbe auf das Gefühl, mit dem alle künstlerische Wirkung erfaßt wird, viel unmittelbarer als das Relief.

Die Baustoffe, die am fertigen Bauwerk in natürlicher oder künstlicher Farbe zutage liegen, sind zum weitaus größten Teil nur verkleidende Überzüge, hinter denen sich die eigentlich aufbauenden Stoffe, Backstein, Klinker, Beton Eisen, Holz, verbergen. Dies Überkleiden des konstruktiven Baukerns ist aus praktischen Gründen bei unserer heutigen Art zu bauen meist notwendig. Die Verkleidung soll die Baustoffe des Kerns schützen, sie soll rauhe Flächen glätten und das Licht in geeigneter Weise zurückwerfen, sie soll die Wärmedurchlässigkeit herabsetzen, sich abwaschen und reinigen lassen usw. Die sichtbare Außenseite von Bauwerk und Raum und ihre architektonische Gliederung wird sich daher dem betrachtenden Auge in der Hauptsache in den Stoffen dieser Verkleidung darstellen, wobei diesen in erster Linie die Aufgabe zufällt, die durch konstruktive Rücksichten der verschiedensten Art bedingte Anordnung der einzelnen eigentlich bauenden Stoffe, die zwar dem konstruktiven Zweck genügt, auf das unbefangene Auge aber wie bunte Willkür wirken muß, dem Blick zu entziehen und den Eindruck der Sauberkeit und Ordnung zu erreichen. So wird Backsteinmauerwerk verputzt, in Holz konstruierte Decken erhalten eine Stuckverkleidung, Eisen und Holz werden gegen die Einwirkung der Witterung durch Ölfarbenanstrich geschützt. In diesem Sinne ist also der Farbenanstrich ebenso ein Verkleidungsmittel, wie etwa Putz, Stein, Linoleum oder dgl. Ein derartiger Farbenschichtüberzug (er kann auch durch chemische Verfahren u. a. hergestellt werden) hat bestimmte stofflich-praktische Aufgaben zu erfüllen. Unter dem Begriff „Farbe“ schlechthin soll jedoch im folgenden nur die farbige Erscheinung der Bauglieder verstanden werden, gleichviel ob sie eine natürliche Eigenschaft der Baustoffe, oder ob sie mit ihnen oder mit ihrer Oberfläche künstlich verbunden ist.

II.

Die Aufgaben, die die Farbe in der Baukunst zu erfüllen hat, sind mannigfacher Art. Wenn hier eine Sonderung derselben versucht wird, so hat das nur Bedeutung für die Übersichtlichkeit der Darstellung. In Wirklichkeit verquicken sich in jedem einzelnen Falle, also auch in den angezogenen Beispielen, meist mehrere der einzeln behandelten Gesichtspunkte.

Die Wahl und Anordnung der Farben verfolgt zunächst praktische Zwecke. Sie soll Übersichtlichkeit und Ordnung schaffen. Gleichartiges und Zusammengehöriges wird zusammengefaßt. Besonderes wird durch auffallende Farbe hervorgehoben. Ein Fensterrahmen beispielsweise wird nach der üblichen Konstruktion teils aus Kiefernholz, teils und zwar an den Stellen, die besondere Widerstandsfähigkeit erfordern, aus Eichenholz hergestellt. Die Ecken erhalten zu ihrer Versteifung glatte eingelassene Eckbänder (Scheinecken) aus Eisen. Es fällt wohl keinem ein, zeigen zu wollen, er habe für Sprossen und Wasserschenkel dieses Fensterrahmens das wertvollere Eichenholz verwendet, es ist vielmehr allgemeiner Brauch, die hier aus guten technischen, für das Auge des Laien jedoch nicht ohne weiteres ersichtlichen Gründen zusammengestellten Bestandteile mit einem einheitlichen Farbenanstrich zu überziehen. Der Fensterrahmen erhält eine Verschlußvorrichtung mit handlichem Griff. Dieser soll als etwas Besonderes ins Auge fallen, damit man ihn stets leicht findet. Er erhält also eine abstechende Farbe, womöglich das glänzende Gelb des Messings oder der Bronze. Eine derartig ordnende Wirkung leistet die Farbe im kleinen wie im großen. Nur sie vermag diese Aufgabe zu erfüllen.

Ihre Unterscheidungen sind namentlich bei unzureichender Beleuchtung auch dort noch kenntlich, wo Formen nicht mehr unterschieden werden können. Ein schlecht beleuchteter Raum erscheint durch lichte Farben seiner Wände hell und wird durch lebhafte Farbengegensätze seiner Gegenstände übersichtlich. Das gleiche gilt für einzelne Raumteile. Ein Lichtschacht erhält weiße Wände, die das Licht möglichst vollkommen zurückstrahlen. Ein mangelhaft beleuchteter Flur erhält helle Wände und etwa dunkle Türen mit weißer Aufschrift. Namentlich in einer Folge von Räumen ist die reflektierende Wirkung der verschiedenen Farben ein unentbehrliches Hilfsmittel zur Erreichung einer guten Lichtführung. Auch für mancherlei praktische Einzelzwecke gewinnt die Farbe Bedeutung, so für die Sauberhaltung der Räume. Wandsockel, die fortwährend der Einwirkung von Staub und Schmutz ausgesetzt sind, legen die Wahl einer dunklen Farbe nahe, auf der der Staub wenig ins Auge fällt; klinische Räume, bei denen peinlichste Sauberkeit gefordert wird, verlangen eine Farbe, die jedes Stäubchen sichtbar macht.





Abb. 1a. Altes Rathaus in Cassel. Abb. 1b.

Was für den Fensterrahmen galt, das gilt aus praktischen wie aus ästhetischen Gründen für das ganze Bauwerk, für die Fassaden, für jeden Raum. So konnte der Meister des Friedrichsbaues in Heidelberg den sehr reichen Figurenschmuck und einen Teil der Bildhauerarbeiten aus weichem, weißem Sandstein arbeiten lassen und diesen unbedenklich neben den härteren roten Stein der Fassade stellen, da die jetzt nur noch in ganz geringen Resten erhaltene, einheitliche Bemalung den störenden unregelmäßigen Farbenwechsel zudeckte. Ordnende Zusammenfassung, Übersichtlichkeit, Regelmäßigkeit, Vereinfachung sind unerläßliche Voraussetzung eines jeden Kunstwerkes. Wenn die Hauptarbeit einer guten architektonischen Komposition darin besteht, alle die vielen durch das Programm vorgeschriebenen großen und kleinen Räume, Gänge und Winkel zu einem einheitlichen Ganzen von möglichst einfacher Gesamtform zusammenzuzwingen, so muß die Farbe für die äußere Erscheinung des gesamten Bauwerks wie jedes einzelnen Teils dem gleichen Zweck dienen, d. h. sie muß alles Kleine, alles durch Zufall oder aus praktischen Gründen Verschiedene und Widerstrebende einer großen Idee dienstbar machen.

„Immer strebe zum Ganzen, und kannst du selber kein Ganzes
Werden, als dienendes Glied schließ' an ein Ganzes dich an."

Das Wort bezeichnet der Dichter als „Pflicht für jeden". Es gilt auch für jede künstlerische Wirkung.

Solcher gewaltig ordnenden Kraft und Gleichmäßigkeit verdankt der Palazzo Pitti seine überwältigende Wirkung, die die späteren Erweiterungen noch gesteigert haben dadurch, daß sie sich dem Gesetze des alten Baues fügten. Doch nicht überall stehen solche Steinmassen zur Verfügung. Ärmere Gegenden haben sich auch für ihre Paläste auf verputztes Backsteinmauerwerk beschränken müssen und nur an den Stellen, wo die Festigkeit und Beständigkeit des Putzes nicht ausreichte, oder wo er die beabsichtigte Einzelform nicht darzustellen vermochte, den teureren Werkstein verwenden können. In solchen Fällen zerstörten die verschiedenen Baustofffarben die gewollte Einheit des Werkes. Sie mußte durch aufgetragene Farben wiederhergestellt werden. Wo der Baustoff ein genügendes Relief gestattet, wird ein einfarbiger Anstrich genügen, um ein Auseinanderfallen der einzelnen Stofffarben zu verhüten. Eine im positiven Sinne zusammenfassende Wirkung wird jedoch erst durch einen rhythmischen Farbenwechsel erreicht. Die zwingende Gewalt einer derartigen Farbengebung hat uns beispielsweise die Erneuerung der alten Bemalung der Schloßanlage in Bruchsal wieder vor Augen gestellt. Stehen doch die Werke der Barockkunst im ganzen Lande als Zeugen einer großen Zeit, die zur Rückkehr zu Einheit und Kraft in der Kunst gemahnen. Die Fassaden der Schloßgebäude in Bruchsal sind schlicht und bescheiden im Relief, aus Putz, Sandstein, Holz (für das Hauptgesims) und Stuck hergestellt. Dazu kommt das Holzwerk der Fenster und Türen, sowie das Metall der Gitter und Beschläge — also eine reiche Musterkarte verschiedener Baustoffe, die nach dem jeweiligen praktischen Bedürfnis verwendet sind. Das Hauptsystem der erneuerten Farbengebung ist folgende: Erdgeschoß und Fensterarchitektur der Obergeschosse: grau; Pilaster und Hauptgesims: rot; glatte Grundflächen: gelb; Holzwerk der Fenster und Läden: weiß; eiserne Gitter: vergoldet; ein sehr reiches Farbengefüge, auf dessen feinere Durcharbeitung und Abstufung an dieser Stelle nicht eingegangen werden soll. Die Wirkung ist eine große. Denn durch die Farbengebung wird der ganze monumental komponierte Gebäudeblock als etwas unbedingt Zusammengehöriges und als stolz geschaffenes Kunstwerk in bewußten Gegensatz gestellt zu aller Umgebung. Jede Gebäudemasse, jede Fläche, jede Flucht, jede Linie wird als Teil einer großen Komposition gekennzeichnet, in der jedes Glied dem Ganzen gehorcht und ihm dient. Gleichzeitig wird das Ganze über etwa störende Zufälligkeiten der Beleuchtung hinausgehoben; denn die einigende Wirkung der Farbe ist weit eindrücklicher als die eines einheitlich behandelten Reliefs.

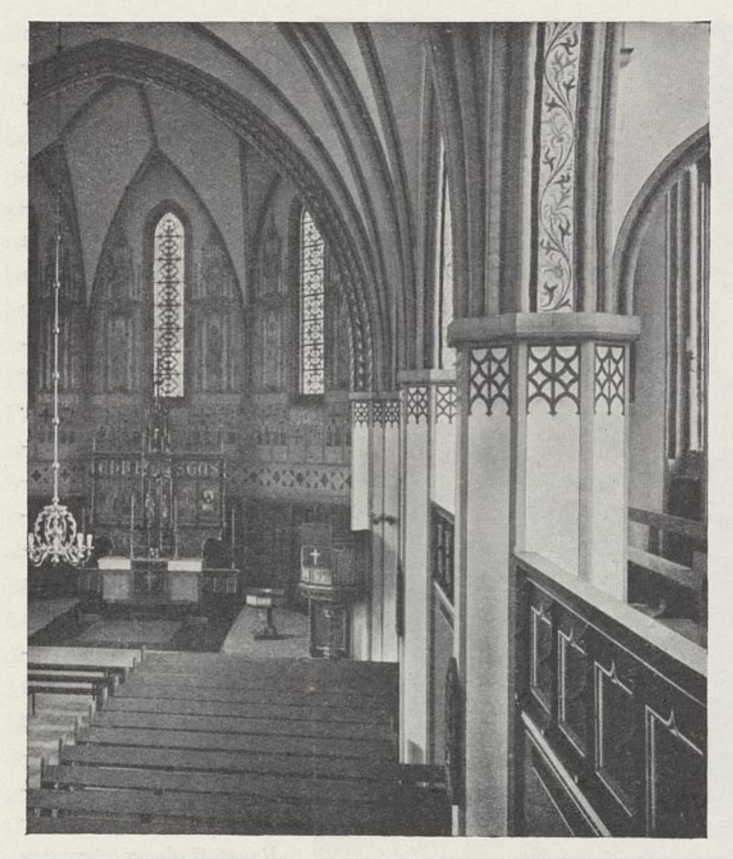


Abb. 2. Evangelische Kirche in Neustadt (Westpr.).

Das ist auch der Hauptgrund für die farbige Behandlung der Putzfassaden, wie wir sie namentlich in Tirol und Oberitalien noch auf Schritt und Tritt antreffen. Handelt es sich um kleinere Bauten, so genügt ein Wechsel von zwei Farben vollauf — etwa Weiß-Gelb (Abb. 1a u. b); Weiß-Grau; Gelb-Grau —, um die Reihenwirkung, den Rhythmus, und damit die Einheitlichkeit zu erreichen. Wesentlich ist weder der Reichtum noch die große Lebhaftigkeit der Farben, sondern allein die Verteilung. Wie wohltuend ruhig wirken in den Schlössern der Barock- und Rokokozeit die im Zierat oft so überreichen, doch lediglich auf einen leuchtenden Farbenzweiklang gestimmten Räume in Weiß-Gold, Braun-Gold, Zinnober-Gold, Grün-Gold, Grün-Silber, Blau-Silber usw.! Diese Farben ziehen sich dann allerdings über Wände, Türen, Decke, Möbel gleichmäßig hin, mag das Material nun Holz, Stuck oder Metall sein. Und wie gewaltig faßt der farbendurchwirkte musivische Goldteppich, der sich in altchristlichen Kirchen über die ganzen Gewölbe- und oft auch über die Wandflächen zieht, die Räume zusammen!

In den genannten Beispielen ist es der gleichmäßige Rhythmus, der eint und verbindet. Werden die Intervalle größer, so entstehen Höhepunkte und Abstufungen in der Reihe, wie sie eine bedeutende Komposition verlangt. Bei der Gebäudeanlage in Bruchsal bildet das Schloß selbst den Hauptkörper. Seine Fassaden tragen die erwähnte Farbengebung. Am Mittelrisalit erfährt die Anordnnng durch das Vorherrschen von Gelb und das Hinzutreten von reicherer Vergoldung eine Steigerung, es zieht als bedeutender Mittelpunkt der ganzen Anlage in erster Linie die Blicke auf sich, während die Nebengebäude eine schlichtere Farbengebung dadurch erhalten haben, daß eine der drei Hauptfarben des Schloßgebäudes ausgefallen ist. Es wird also möglich, die Teile eines Bauwerks, eines Raumes innerhalb des zugrunde gelegten Rhythmus durch schlichtere oder reichere Farbengebung zu werten, nach ihrer Bedeutung für die Gesamtwirkung abzustufen. Ähnliches gilt für eine Raumfolge, bei der das Nebeneinander in ein Nacheinander der künstlerischen Eindrücke aufgelöst wird (ähnlich wie bei der Musik). Eine Flucht gleichartiger Räume wird auch in der Farbengebung etwa gleichwertig behandelt werden. So ist bei den erwähnten Zimmern der Barockschlösser, in denen bei Festlichkeiten durch die geöffneten Flügeltüren die Gesellschaft hin und her flutet, gewöhnlich ein jedes auf einen bestimmten Farbenton (bereichert durch Gold oder Silber) gestimmt. Alle zusammen geben einen volltönenden Akkord als Glieder einer Einheit. In anderen Fällen gewahrt der Eintretende beim Voranschreiten durch Vorflur, Treppenraum und Vorzimmer eine allmähliche Steigerung der farbigen Ausdrucksmittel, etwa vom schlichten Weiß oder Weiß-Grau bis zu reicher Farbenentwicklung im Festsaal. Die bloße Steigerung der Raumverhältnisse und des Reliefs wird gleiche Wirkungen nicht erreichen können. Wenn demgegenüber in einem neueren Stadthaus die große monumental gehaltene Ehrenhalle unter einer weißen Decke an den hohen Wänden lediglich das einfarbige Grau des natürlichen Werksteins zeigt, während die anstoßenden Flure und Treppenhäuser eine lebhafte weiß-rot-graue Farbengebung erhalten haben, so muß letztere gegenüber der Haupthalle als wesentliche Steigerung empfunden werden, ohne daß dafür ein Grund ersichtlich wäre.

Beim einzelnen Baukörper (Raum) erwächst dem Architekten die Aufgabe, seine Raumwirkung herauszuarbeiten und zu möglichst kräftigem Ausdruck zu bringen. Das geschieht durch Gliederung: Teilen und Verbinden. Die Mittel dazu sind Relief und Farbe. Fallen dem Relief in erster Linie die eigentlich tektonischen Wirkungen zu, so können diese durch die Farbe wesentlich unterstützt und gesteigert, z. T. sogar ersetzt werden. Andere raumbildende Wirkungen bleiben der Farbe allein vorbehalten. Ist eine plastische (tektonische) Raumgliederung vorhanden — und dies wird, wenn in noch so bescheidenem Umfange, wohl stets der Fall sein —, so schließt sich die Farbengebung ihr naturgemäß an, um sie zu unterstützen, oder auf ihr als Grundlage sich aufzubauen. Denn nur so kann die Einheit der Gesamtwirkung gewahrt werden. Die Glieder gleicher struktiver Bedeutung werden durch einen Farbenton bzw. eine Farbentongruppe zusammengefaßt und gegen andersfarbige Flächen abgesetzt. Das gilt für schlichte Kanten und Rahmen von Wand-, Tür- und Fensteröffnungen, ebenso wie für Säulen, Pfeiler und Profilierungen. So wird die größte Klarheit und Eindrücklichkeit der architektonischen Gliederung erreicht, wie sie die mittelalterliche Kirche in ihrer Farbengebung am reinsten verkörpert hat. Die Erneuerung derartiger alter Bemalungen sowie die Anwendung des Systems auf eine Anzahl neuerer Kirchen haben die hervorragende tektonische Wirkung einer solchen Behandlung neuerdings vor Augen geführt. Bei dem in Abb. 2 dargestellten Beispiele sind Backsteinprofile und Putzflächen zunächst weiß gestrichen und dann die Gliederungen mit einem kräftigen Grau und tiefem Rot — letzteres für die Kehlen der Profile — abgesetzt worden. Auf solchem bescheidenen Gerippe kann dann gegebenenfalls eine reichere farbige Behandlung aufgebaut werden. Bei ganz bescheidenen Mitteln hat oft eine Behandlung in diesem Sinne eine plastische

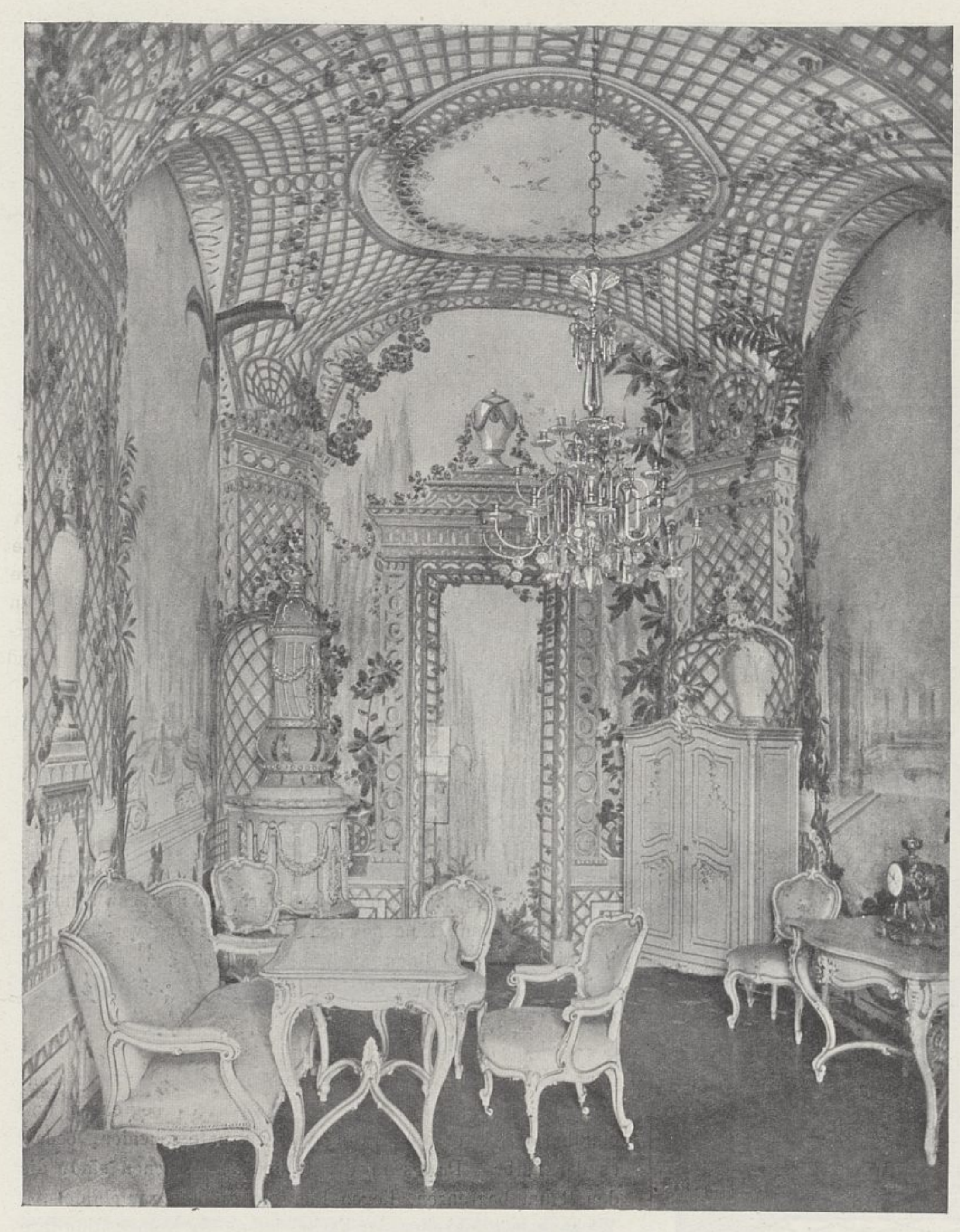


Abb. 3. Zimmer im Schloß Schönbrunn.

verdeutlicht, die Konturen hell umrändert, der Grund dunkel vertieft usw. Durch dieses einfache Mittel lassen sich außerordentliche Ausdruckssteigerungen erzielen. Es kehrt bei aller Kunstübung wieder. Auf diesem Grundsatz beruht vor allem die farbige Behandlung des griechischen Tempels. Soviel wenigstens geht aus den erhaltenen Farbenresten und den danach gemachten Rekonstruktionen mit Sicherheit hervor. Ob eine vollständige Zusammenfassung der tektonisch zusammengehörigen Glieder durch die Farbe im Sinne der vorangegangenen Darlegung stattgefunden hat, scheint sich noch nicht mit Sicherheit feststellen zu lassen. Immerhin fällt es bei den bisherigen farbigen Wiederherstellungsversuchen auf, daß Farben hauptsächlich am Gebälk und im Giebelfeld verzeichnet werden, also dort, wo sich die Reste im Schutze der Hauptgesimsplatte offensichtlich am längsten erhalten konnten. Die Tatsache legt die Vermutung nahe, daß an stärker gefährdeten Stellen die Farben zerstört wurden und daß ursprünglich ein gewisses durchgehendes Farbensystem, wenn auch nicht überall gleich reich, dem Bauwerk die bei der jetzigen Darstellung gestörte Einheit (vgl. Abb. 4) gewahrt habe. Die am Gebälk und im Inneren erhaltenen Farben erreichen jedenfalls, abgesehen

Gliederung teilweise oder auch ganz ersetzt, namentlich in der Barockzeit, in deren Bauten für derartige tektonische Ausmalungen in bescheidenster wie in reichster Ausbildung köstliche Beispiele erhalten sind (Abb. 3). Sie fußen auf demselben Grundgedanken wie die farbige Behandlung der mittelalterlichen Kirchen.

Eine entwickelte Kunst verfolgt im allgemeinen das Bestreben, den konstruktiven Gliedern oder ihren Verkleidungen Formen zu geben, die die tektonische Bedeutung des Gliedes kennzeichnen. Die folgerichtige Durchführung dieses Grundsatzes hat zu derartig organischen Kunstgebilden geführt, wie zum griechischen Tempel und zur gotischen Kathedrale. Die struktive Bedeutung jedes Gliedes drückte sich in erster Linie durch seine plastische Form aus. Doch das genügte nicht. Die Form, in weiter Entfernung und bei ungünstiger Beleuchtung nicht klar erkennbar, wurde durch farbige Bemalung

von der aus ihnen lachenden Lust an prächtigem Schmuck, eine energische Loslösung der Bauglieder von einander und vom Grunde und damit eine wesentliche Verstärkung des Reliefs. Gewöhnlich wurden die Gründe dunkel gefärbt, so die der Kassetten und der Metopen- und Giebelfelder. Bei einigen erhaltenen korinthischen Kapitellen ist beispielsweise der Kelchgrund rot, die Blätter abwechselnd gelb und grün bemalt. Eine so energische Farbengebung läßt ermessen, welche große Rolle der Farbe in der antiken Kunst zufiel.

Die gleiche Behandlung findet sich in der mittelalterlichen Kunst wieder. Hier läßt sich bei der großen Menge vortrefflich erhaltener Beispiele genau verfolgen, wie weit Plastik und Malerei in der Gestaltung der Formen Hand in Hand gegangen sind, und sich gegenseitig zu immer ausdrucksvollerer Wirkung gesteigert haben. Die feinen Rund- und Kantenstäbe der späteren Gotik hoben sich in hellen Farben

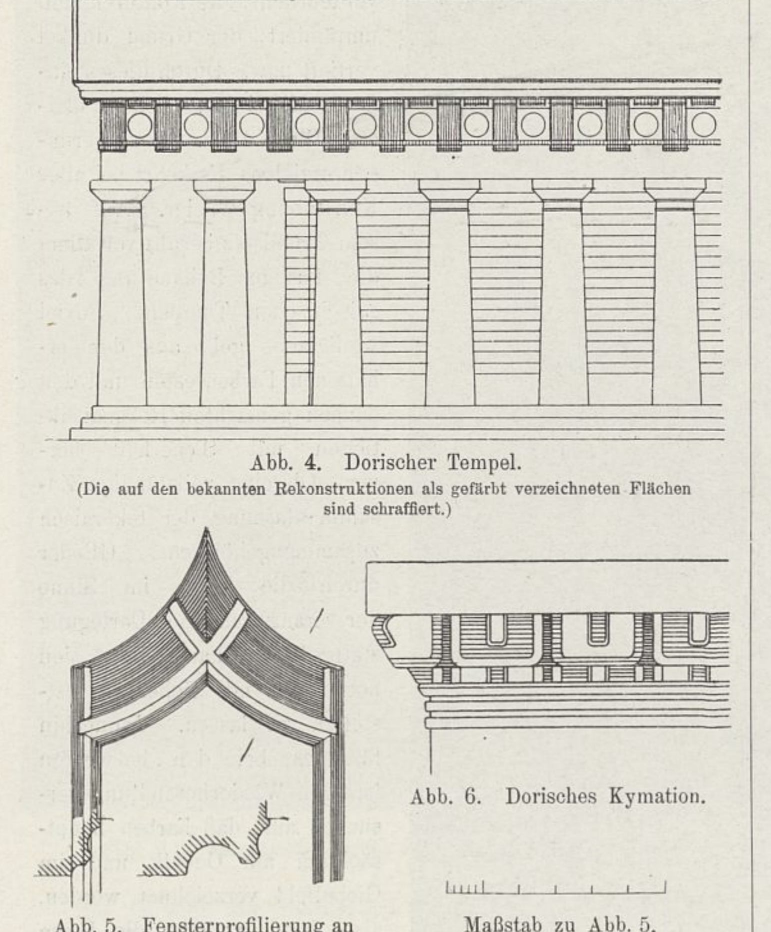


Abb. 4. Dorischer Tempel.
(Die auf den bekannten Rekonstruktionen als gefärbt verzeichneten Flächen sind schraffiert.)

Abb. 5. Fensterprofilierung an der Moritzburg in Halle a. d. S.

Abb. 6. Dorisches Kymation.

Maßstab zu Abb. 5.

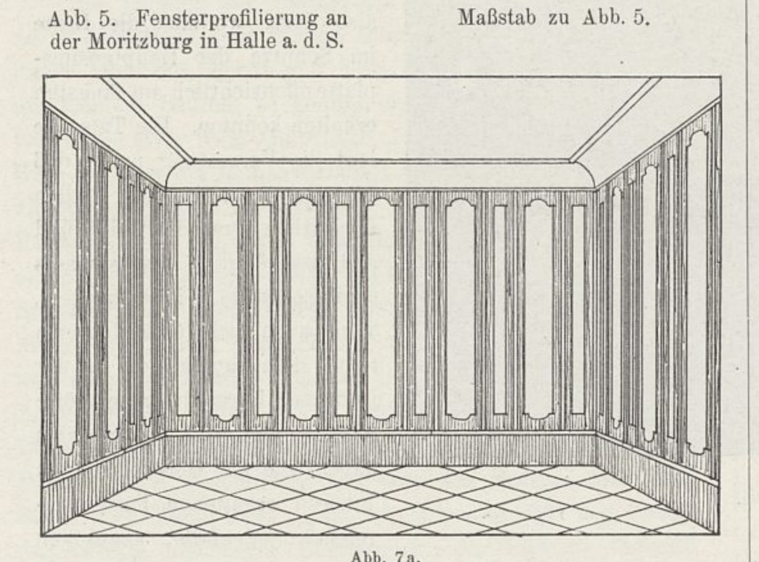


Abb. 7a.

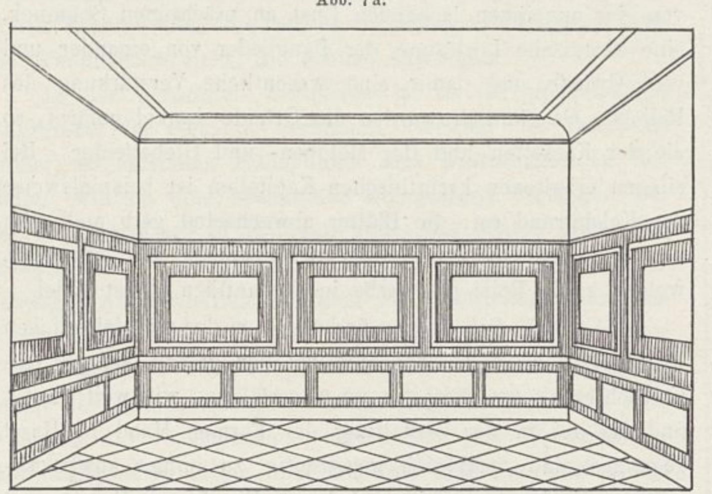


Abb. 7b.

Abb. 7a u. 7b. Muster für die Wirkung farbiger Feldverteilung.

oder Gold von den dunkelgefärbten Kehlen ab (Abb. 5), die Gewandfalten der Figuren wurden dunkel gefärbt, zierlich modelliertes Laubwerk prangte vergoldet vor dunkelroter Hohlkehle usw. Ähnliche Anordnungen, etwa plastisches Steinornament auf schwarzbraungefärbtem Grunde, finden sich zu allen Zeiten, so auch fast allgemein in der Kunst der italienischen Renaissance, wenn auch nicht in so folgerechter Durchführung. Auch hier ersetzt die Farbe in vielen Fällen das fehlende Relief durch bloße Aufmalung von Blattwerk u. dgl., beispielsweise am antiken Kymation (Abb. 6), an gotischen Kapellen usw. Selbstverständlich mußte in eine derartige farbige Behandlung das Figurenwerk genau so wie das übrige Relief organisch einbezogen werden, bildete es doch meist den Höhepunkt der künsterischen Komposition. Das geschah beim griechischen Tempel wie bei der mittelalterlichen Kirche. Mochte die Farbengebung nun mehr eine stilisierte, konventionelle oder mehr naturalistische sein, ihr Zweck blieb stets, die ihr zugewiesene Aufgabe in der Farbenrechnung des Raumes auszufüllen. Hierfür konnte an einem Ort ein gleichmäßiger Farbenton genügen, am anderen eine reich differenzierte farbige Detaillierung erforderlich werden. Wie viele prunkende Marmorfiguren bleiben in dieser Hinsicht ihre Aufgabe schuldig, die am andern Ort eine schlicht bemalte oder getönte Holzfigur glänzend erfüllt! Unsere heutige Kunst hat die Ausnutzung solcher Wirkungsmöglichkeiten fast ganz fallen lassen.

Besser steht es um die Anwendung der Farbe auf ihrem Hauptwirkungsgebiet, der Fläche. Machen sich plastische Formen dem Auge bei entsprechender Beleuchtung durch ihre Schattenwirkungen kenntlich, so können Flächenteile, die in derselben Ebene liegen, nur durch Farben wirkungsvoll unterschieden werden. Eine gewisse Unterscheidung von hell und dunkel kann allerdings auch hier durch glatte oder rauhe Oberflächenbehandlung erreicht werden, wobei unter den Begriff der Rauheit alles plastische Flächenornament rechnet. Die Wirkungsmöglichkeiten einer derartigen Oberflächenbehandlung sind aber in Hinsicht auf die farbige Erscheinung recht gering. Das Relief kann Flächen absetzen, begrenzen und einrahmen. Um sie wirkungsvoll zu unterscheiden, bedarf es der Farbe. Da es in der Hauptsache Flächen sind, die den Raum begrenzen, liegen hier die größten raumbildenden Wirkungsmöglichkeiten der Farbe, indem die Komposition ihre verschiedenen Mittel auf die farbige Behandlung der Raumflächen anwendet.

Der einigenden Wirkung großer, durch die Farbe zusammengefaßter Flächen wurde schon wiederholt gedacht, mögen die Flächen nun einfarbig oder durch rhythmisch wiederkehrende verschiedene Farben behandelt sein. Solch ein Rhythmus wird durch eine Felderteilung erreicht, aus der bei reicherer Gliederung das Flächenornament entsteht. Beide, Felderteilung und Flächenornament, sind entweder in der Richtung neutral, wie beispielsweise das aus Quadraten gebildete Schachbrettmuster, oder sie betonen eine Richtung, unterscheiden ein Oben und Unten oder ein Rechts und Links. Darin und in der Wahl des Maßstabes liegt die tektonische Wirkung dieser Muster, Teilungen oder Gliederungen beschlossen. Zu den einfachsten tektonischen Mitteln gehören in diesem Sinne der mehrfarbige Schichtenwechsel und die gemalte Fugenteilung, beide der stilisierte Ausdruck für die Wand. Die Betonung der Lotrechten macht die Fläche und damit den von ihr umschlossenen

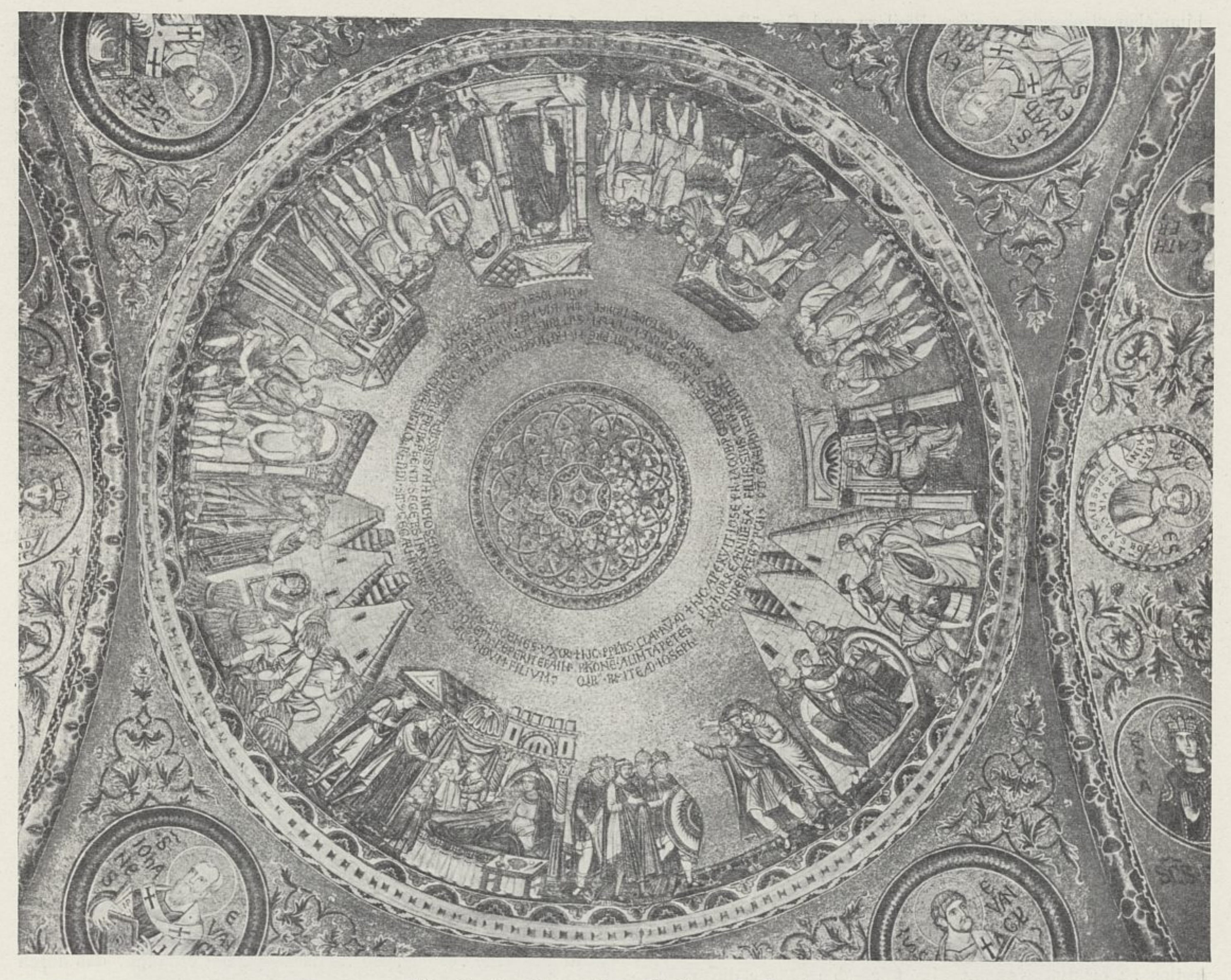


Abb. 8. Gewölbemosaik aus S. Marco in Venedig.

Raum hoch, die Betonung der Wagerechten breit (Abb. 7a und b), ein zierliches Flächenmuster läßt den Raum groß erscheinen usw. Als Beispiel einer reicheren Ausführung sei der hervorragend tektonischen Wirkung der streng komponierten alten Mosaiken, beispielsweise in S. Marco in Venedig gedacht (Abb. 8). Die gewaltigen glatten Gewölbeflächen erhalten erst durch die sichere Felderteilung Richtung und Gliederung und am Maßstab der ornamentalen und figürlichen Einzelheiten gewinnt das Auge einen Anhalt, um die mächtigen Abmessungen des Raumes zu erfassen.

Von großer Bedeutung für die Raumbildung sind ferner die dem Maler so wohlbekannten unmittelbaren Wirkungen des Farbentons auf das Gefühl. Kein anderes Ausdrucksmittel der bildenden Kunst wirkt bekanntlich so unmittelbar, auch auf Gefühl und Gemüt des Laien, als die Farbe. Sie ist in der Art ihrer Wirkung wohl nur der Musik vergleichbar. Ein Farbenton oder Farbenakkord bewirkt mit Leichtigkeit Stimmungen, die plastischen Mitteln kaum erreichbar sind. Mit diesen unmittelbaren Eindrücken übt die Farbe auch raumgestaltende Wirkungen von außerordentlicher Bedeutung aus, da bestimmte Farbentöne ihren Träger dem Auge näher bringen, andere ihn in die Ferne rücken. Eine rote Wand geht zurück, ein gelbes Ornament darauf springt wie plastisch heraus. Eine weiße Decke schwebt leicht über dem Raum und weitet ihn, während eine dunkle schwere Farbe ein lastendes, drückendes Gefühl erzeugt.

Sache der künstlerischen Komposition bleibt es, diese Ausdrucksmittel auf den Raum anzuwenden, ihre Wirkungen zu vereinigen oder als Gegensätze gegenüberzustellen. Wird beispielsweise die Deckenpartie eines Raumes weiß, die Wände dunkel behandelt, so wird das Höher- bzw. Tieferrücken der Grenze von hell und dunkel auf das Verhältnis und die Höhenwirkung des Raumes von entscheidender Bedeutung sein (Abb. 7a u. b). Mit unumschränkter Meisterschaft hat gerade die Barockzeit mit diesem Ausdrucksmittel gearbeitet. Ein Blick in die Danziger Marienkirche, als ein Beispiel von vielen, mag das veranschaulichen (Abb. 9). Auch hier mögen auf Decken, Pfeilern und Wänden wohl Reste farbiger Bemalung aus verschiedenen Epochen vorhanden gewesen sein. Eine davon wieder herzustellen fehlte es vielleicht an Lust, vielleicht an Geld: der ganze Raum wurde gleichmäßig mit weißer Farbe überzogen. Nur die Zone über dem Fußboden, gewissermaßen das engere Milieu, in dem sich die Kirchgänger bewegen, wurde mit den Gegenständen der Ausstattung durch ein 3 bis 4 m hohes Paneel zusammengefaßt und mit kräftigen Farben in energischen Gegensatz zu den

himmelan strebenden weißen Pfeilern und Gewölben gesetzt. Das Paneel wurde in einfachster Weise durch eine Leinewandbekleidung gebildet, und mit Ölfarbe gemalt. Die Wirkung ist gewaltig.

Wurden im vorstehenden die Aufgaben bzw. Wirkungsmöglichkeiten der Farbe in der Architektur kurz skizziert, so konnte dabei nur die flächenhafte farbige Erscheinung der Bauteile und -glieder ins Auge gefaßt werden. Das große, reiche Gebiet der Dekorationsmalerei und der monumentalen Bildmalerei gehören nicht zum Thema. Der ersteren erwächst lediglich die Aufgabe, die angedeuteten Wirkungen der Farbe fortzuführen, zu steigern und zu bereichern, wie es in glänzender Weise wiederum die so verwandten dekorativen Malereien der Antike und des Mittelalters getan haben, mögen sie in Farben gemalt oder in musivischer Technik hergestellt sein. Die monumentale Bildmalerei wird ihrer Aufgabe am besten dort gerecht, wo sie aus der architektonischen Dekorationsmalerei unmittelbar herauswächst. Alle drei Zweige farbiger Behandlung vermögen die Wirkungen der Baukunst bedeutend dadurch zu steigern, daß sie zu der räumlichen Harmonie eine Harmonie der Farben gesellen.

III.

Sieht man von musivischer und ähnlich gearteter Technik ab, so werden zu Dekorations- und Bilddarstellungen meist Palette und Pinsel benutzt. Um den schlichten Flächen und Gliederungen des Bauwerks (Raumes) ihr durch ästhetische oder praktische Rücksichten bedingtes Farbenkleid zu geben, stehen zwei Wege offen: der Farbenauftrag oder die Auswahl von Verkleidungsstoffen mit passender gegebener Farbe. Praktische Rücksichten sprechen bald für den einen, bald für den anderen Weg. Im allgemeinen wird der gegebene Farbenwert der gewollten Wirkung nur annähernd entsprechen können, während die Palette die gestellte Aufgabe nahezu restlos zu erfüllen vermag. Im folgenden mögen die wichtigeren Baustoffe hinsichtlich ihrer Farbenwerte näher betrachtet werden.

Der Haustein, d. h. Sandstein, Kalkstein, Tuff usw., gilt in erster Linie als monumentales Verblendungsmaterial für größere Massen, namentlich für Fassaden. Gewählt wird der Werkstein hier vornehmlich wegen seiner Dauerhaftigkeit, seiner mehr oder weniger großen Wetterbeständigkeit und wegen seiner Eignung für plastische Formengebung. Den letzteren Vorzug namentlich bietet kein anderes Material in gleicher Weise, mag es sich nun um wuchtige Ausladungen oder feine Gliederungen handeln. Grund genug dafür, daß Gegenden, denen natürlicher Haustein leicht erreichbar war, zu allen Zeiten die führende Formensprache in der Baukunst ausgebildet haben.

Unsere Zeit beweist eine erstaunliche Unempfindlichkeit in bezug auf Farbenreinheit. Zeiten mit feinem Empfinden genügte für künstlerische Wirkungen das Ansehen eines roh gelassenen Quaderbaues, wie beispielsweise der Marburger Elisabethenkirche, nicht. „Die Fugen sind glatt verstrichen, die Flächen gänzlich mit einem äußerst dünnen Putz überzogen und rot gefärbt und schließlich wieder Fugen mit weißer Farbe (und zwar nicht immer auf den wirklichen Steinfugen) aufgemalt.“ [3]) In ähnlicher Weise überzog eine farbige Bemalung unendlich viele Quaderbauten vom 13. bis ins 16. Jahrhundert. Der Bemalung der antiken Tempel wurde bereits gedacht. Man trug kein Bedenken, Marmor teils deckend, teils lasierend zu bemalen. Sand-, Kalk- und Tuffsteine wurden 1 bis 2 mm stark überputzt und dann mit Farbe gestrichen. Auch hier also das gleiche Bestreben, zuerst eine glatte saubere Fläche zu erzielen und sie dann zu bemalen, und zwar mit kräftigen, oft leuchtenden Farben. Wir haben uns gewöhnt, an die Stelle solcher künstlerischer Ausdrucksmittel die kleinen Farbenabstufungen der Zufallstönung zu setzen und in ihnen ästhetische Werte zu erblicken. Hiermit soll die antike Kunstauffassung für unsere heutige Zeit nicht als maßgebendes Vorbild hingestellt werden. Es wird jedoch von Nutzen sein, sich die Kunstübungen früherer Zeiten klar vor Augen zu führen, um am Vergleich mit ihnen zu ermessen, wie weit unsere heutige Baukunst das Ausdrucksmittel der Farbe außer acht gelassen hat, und zwar zum Teil gerade in mißverständlicher Auffassung der Kunst der Antike. Eine solche farbige Bemalung des Äußeren fordert allerdings gewisse Aufwendungen für ihre Unterhaltung. Dafür schützt sie aber auch den Stein gegen Unbilden der Witterung, wie wir es neuerdings durch Tränken mit Fluaten u. dgl. versuchen und wie es der Farbenüberzug geschichtlicher Bauten, solange er instandgehalten wurde, in hohem Maße getan hat. Diese Zeiten scheuten nicht die Kosten für die Unterhaltung des Kleides, um das Gestein selbst den zerstörenden Einflüssen der Witterung zu entziehen. Im Gegensatz zu der angestrebten ruhigen Glattheit der genannten geschichtlichen Richtungen bevorzugt die heutige Mode gerade die unruhige, rauhe, löcherige Oberfläche, vornehmlich wohl, um „reizvolle“ Abwechslung in die farblosen Flächen zu bringen (Abb. 11a), ja man wählt Muschelkalksteine, die infolge des späteren Auslaufens des Kalkes eine so regellose Buntscheckigkeit erhalten, daß durch den scharfen, dem Zufall überlassenen Kontrast zwischen Weiß und Schwarz die plastischen Wirkungen oft geradezu zerstört werden. Eine gewisse künstlerische Wirkung kann durch solche Maßnahmen nur insofern erzielt werden, als die natürlichen Zufälligkeiten des Baustoffes eine Musterung, gleichsam ein Netz über die Flächen ziehen, das die plastischen Formen mildert und zusammenfaßt. Diese Wirkung wird jedoch bei fortschreitender Verwitterung und Verschmutzung immer mehr dem Spiel des Zufalls preisgegeben. Im Gegensatz hierzu mag an die stilisierende Behandlung erinnert werden, die mehrfach die Quadern der deutschen Renaissancebauten, etwa am hohen Tor in Danzig, erfahren haben. Hier sind in die sauber gestockten Steinbossen Blätterranken vertieft eingearbeitet worden. Wenn ein solches Verfahren uns heute auch absonderlich erscheint, so legt es doch beredtes Zeugnis dafür ab, wie weit das Bestreben jener Zeit ging, das Zufällige aus der Kunst auszuschalten und die bewußt geschaffene Form an seine Stelle zu setzen. Mit der heutigen Auffassung der Steinbehandlung verwandt ist die Neigung, durch künstliches „Altertümlichmachen“ Wirkungen zu erreichen, die sonst nur bei ungenügender Unterhaltung des Bauwerks Zeit und Zufall hervorbringen. Solche Neigungen waren Zeiten einer selbstbewußten Kunst nicht bekannt.

Im übrigen ist die Art der Farbengebung stets dem Wechsel des Zeitgeschmacks unterworfen gewesen. Und

3) Schäfer, Von deutscher Kunst.

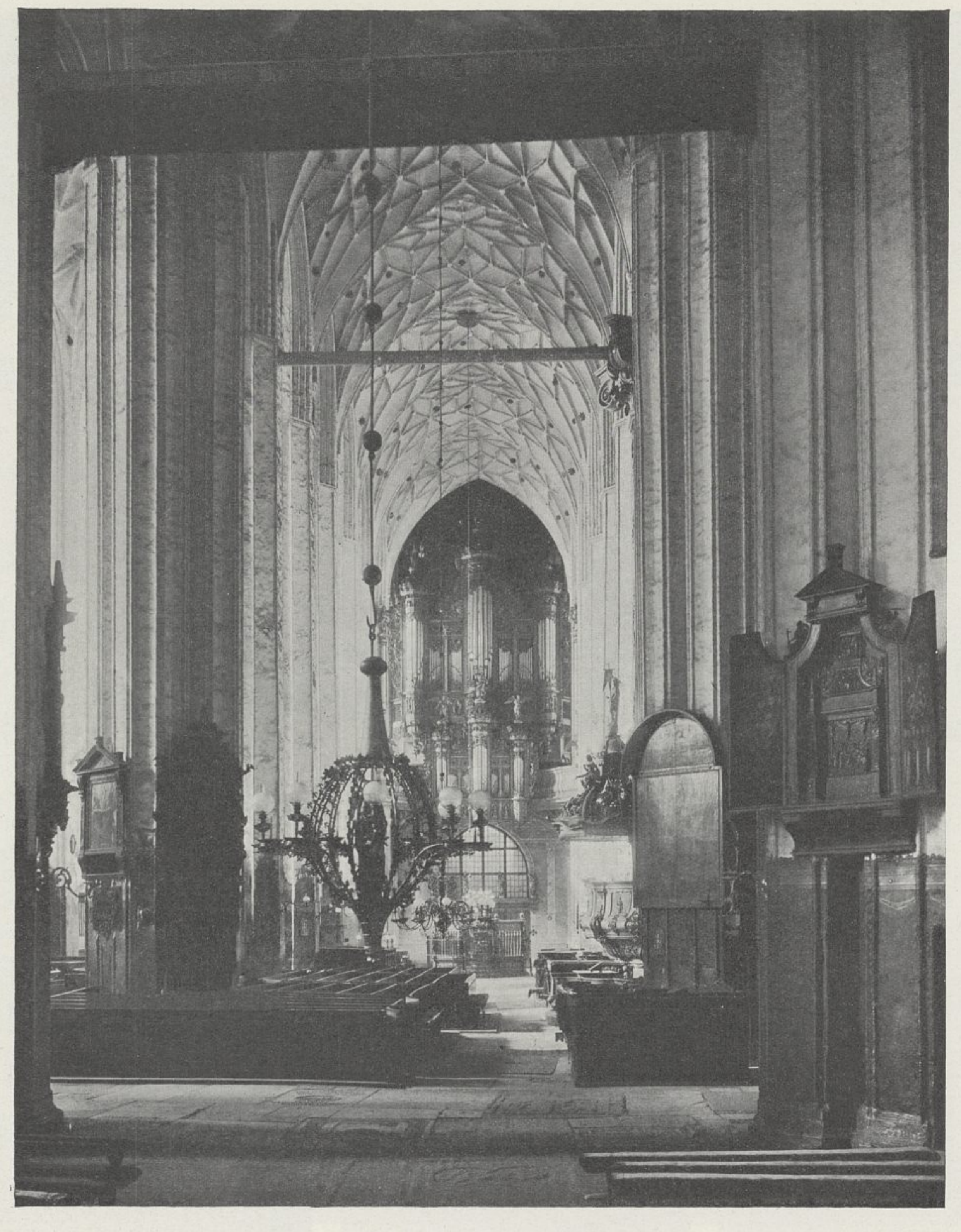


Abb. 9. Marienkirche in Danzig.

gerade geschlossene Werksteinmassen sind, wie der Palazzo Pitti zeigt, mächtiger künstlerischer Wirkung fähig. Darin beruht wohl zum guten Teil der Reiz der natürlichen Ruinen, daß, befreit von allem andersfarbigen Beiwerk, wie Fenstern, Dächern usw., große gleichfarbige Steinmassen mit oft bizarrer Umrißform geschlossen der umgebenden Natur gegenüberstehen. Sie sind durch natürliche Verwitterung sozusagen selbst ein Stück Natur geworden. Die künstlichen Ruinen und Felsen, wie sie in der Barockzeit Mode wurden, sind dagegen in ihrer guten Zeit ein bewußtes Kunstwerk. Sie suchen nicht, wie unsere neuen „künstlichen Felsgrotten" u. dgl., natürliche Felsen im kleinen zu kopieren, sondern sie gruppieren die Massen nach künstlerischen Gesichtspunkten und behandeln die plastische Oberfläche des Gesteins (z. B. im Schloßpark zu Wilhelmshöhe) in streng stilisierender Weise. Und wo weiterhin diese Felsen durch architektonische Arkaden und Denkmäler gekrönt werden, da werden die Gliederungen durch Farbe hervorgehoben, wie es verschiedene in Öl perspektivisch gemalte Entwürfe für die große Kaskadenanlage mit dem Herkules im Wilhelmshöher Park veranschaulichen. Auf dem in Abb. 12 dargestellten Entwurf sind die gequaderten Flächen der Bogengänge und des Herkules-

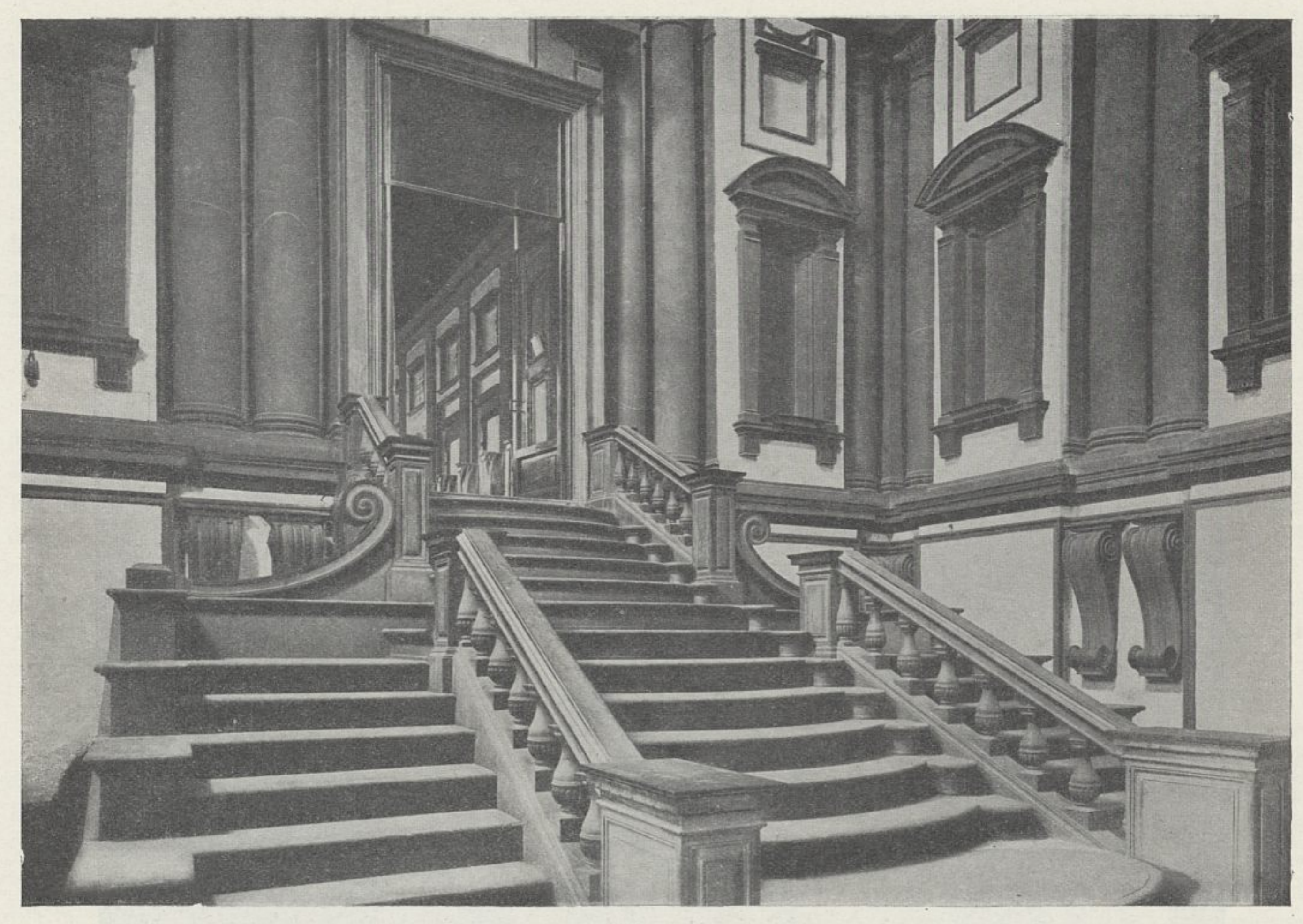


Abb. 10. Vorhalle der Bibliothek von S. Lorenzo (Michelangelo).

denkmals mit einem kalten Grau, alle Gliederungen, d. h. Sockel, Profile, Schlußsteine, Brüstungen, sowie alles Dekorations- und Figurenwerk weiß gestrichen. Daneben steht das Grün der streng architektonisch gehaltenen Heckenwände, Rasenbänke und Zierbäumchen und das Gelbbraun der Kieswege. In diese Umgebung stellt ein anderer Entwurf einen Pavillon mit grau-schwarzen Flächen, grauen Einlagen und weißen Fruchtgehängen und Figuren. Einiges Schmiedewerk trägt die Farben Schwarz, Rot und Gold. Im heutigen Zustande ist das architektonische Gepräge der Anlage durch das Überwuchern der Landschaft und die stattgefundene Verwitterung stark verwischt. Der geplante Zustand bringt gewissermaßen eine Abstufung stilisierender Werksteinbehandlung zum Ausdruck, d. h. eine Steigerung vom rohen Naturgestein bis zur in Form und Farbe künstlerisch behandelten Quader, wie sie uns Antike und Mittelalter zeigten (Abb. 12).



Abb. 11a. Realistisch.

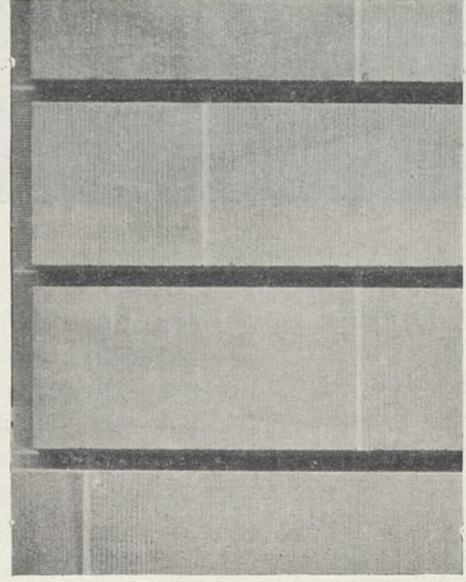


Abb. 11b. Einfach stilisierte Quaderbehandlung.

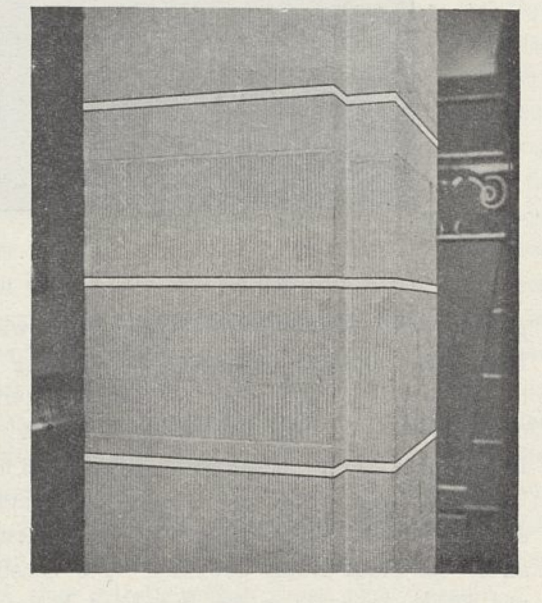


Abb. 11c. Gemalte Quaderung. Flächen grau, Fugen weiß und schwarz.

Abb. 11a bis c. Werksteinbehandlung.

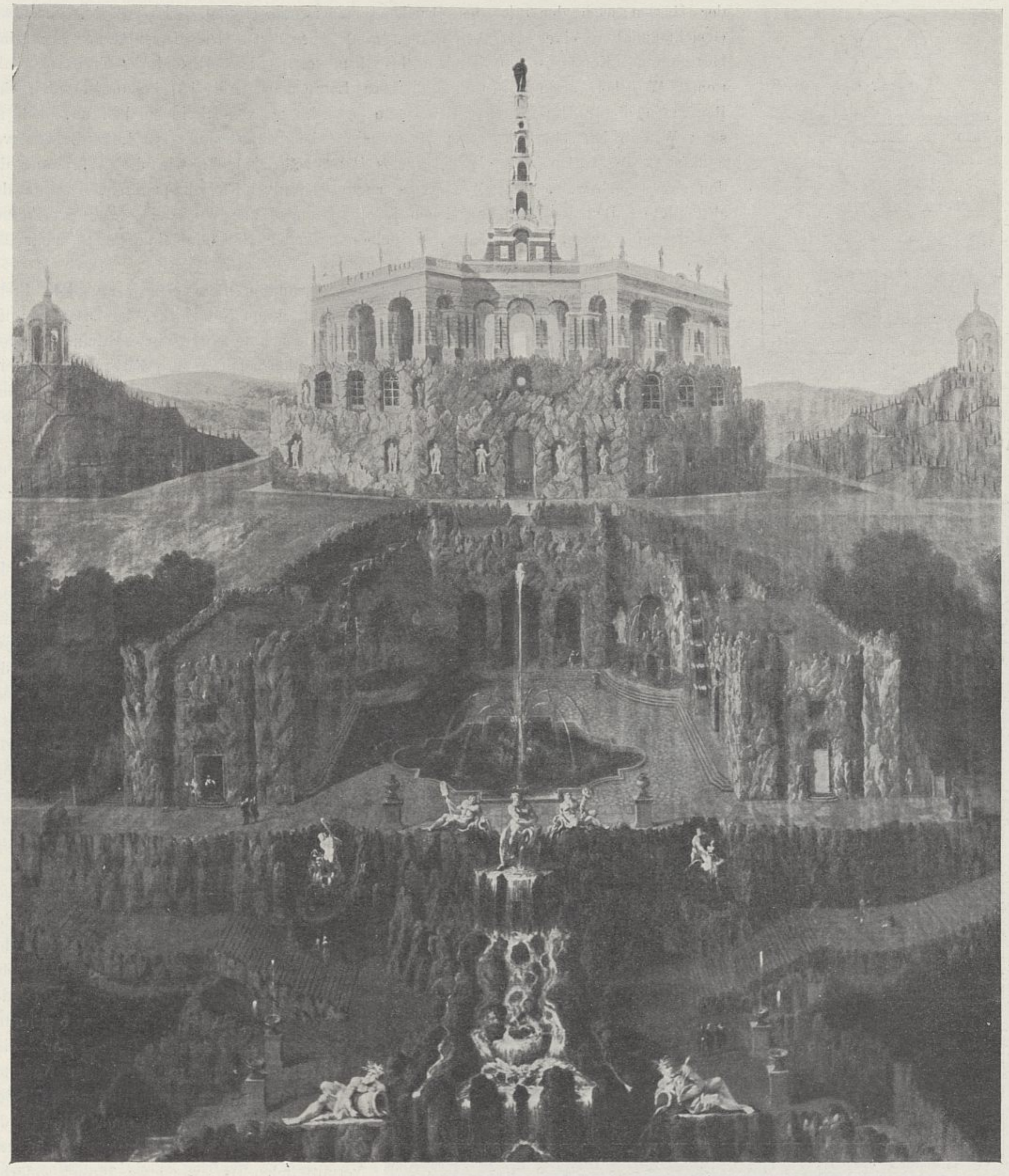


Abb. 12. Entwurf für die großen Wasserkünste in Wilhelmshöhe.

Die heutige Auffassung von der Behandlung der Werksteinfassaden geht auf die italienische Renaissancefassade zurück. Der erste Grundsatz für den farbigen Eindruck einer solchen Fassade ist, wie oben dargelegt, ihre harmonische Einheit. Das Nebeneinanderstellen mehrerer Werksteinarten, etwa die Verwendung eines besonderen Gesteins für den Gebäudesockel, oder gar die Anordnung eines Gesteins für die glatten Flächen im Gegensatz zu einem anderen Steinmaterial für die Hauptgliederung, führt selten zu einem günstigen Resultat. Gewöhnlich ist dann entweder der Farbenunterschied so gering, daß er schmutzig und verwaschen wirkt, oder es fehlt bei stärkeren Gegensätzen jede Harmonie der Farben.

Verbreiteter als die reine Werksteinfassade ist bei uns das Prinzip, nur für die Gliederungen, d. h. für die Teile, deren plastische Formgebung es verlangt, Werkstein, für die glatten Flächen dagegen Mörtelputz zu verwenden. Soll hierbei der Werkstein in Naturton stehen bleiben, so darf er nicht nach praktischen, sondern muß nach dekorativen Gesichtspunkten über die Fläche verteilt werden, d. h. etwa im Sinne eines tektonischen Gedankens oder einer Aufteilung

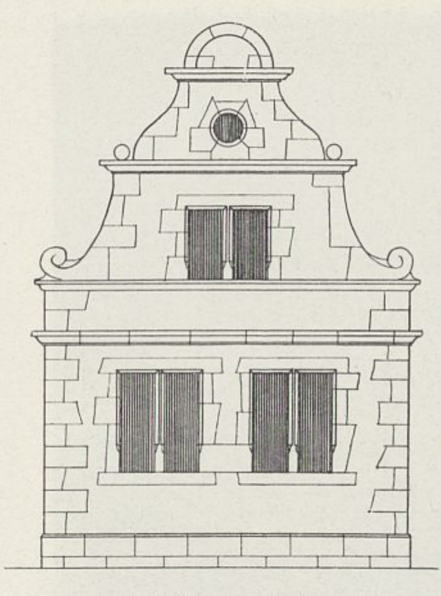


Abb. 13. Putz und Werkstein.

der Massen nach den Gesichtspunkten einer bestimmten Komposition. Wo bei alten Bauten in dieser Hinsicht Willkür herrscht, muß stets auf vorhanden gewesene bzw. beabsichtigte Bemalung geschlossen werden. Ohne den fehlenden Farbenüberzug ist also eine Werksteinanordnung wie die in Abb. 13 dargestellte verfehlt. Ebenso war jenen Zeiten das heute vielfach beliebte Arbeiten mit den malerischen Reizen des Bruchsteinmauerwerks fremd. Es wurde, als etwas Unfertiges, glatt überputzt. Die Innenräume Florentiner Kirchen des Brunellesco (Abb. 14) und die Treppenvorhalle der Bibliotheca Laurenziana (Abb. 10) bekunden durch ihre wohlüberlegte Anordnung von Stein und Putz, daß sie nicht für Bemalung komponiert sind. Das letzte Beispiel von Michelangelos Hand zeigt jedoch, wie die Anordnung des Werksteins nach dekorativen Gesichtspunkten, etwa in den zierlichen Leistenteilungen aus Werkstein, leicht zu Formen führt, die einer gesunden Hausteintechnik nicht mehr entsprechen.

Die bei den genannten Beispielen verwendete Pietra serena hat eine kräftig graue Naturfarbe, die zusammen mit weißem Putz eine angenehme und sehr bestimmte Farbenwirkung ergibt, der sich auch andere Farbentöne gut eingliedern lassen. Solcher Farben erfreuen sich die deutschen Werksteine im allgemeinen nicht. Ihre Farbe ist vielmehr mit wenigen Ausnahmen so unbestimmt und unrein, daß es kaum möglich wird, durch Hinzusetzen einer Putzfarbe einen einigermaßen befriedigenden Farbenakkord zu schaffen, geschweige denn andere Farben (etwa die der Ausstattungsstücke) dazu zu stimmen. Gewöhnlich wird denn auch der Putz annähernd der Steinfarbe entsprechend getönt, woraus sich dann eine unbestimmte und unreine Grundlage für die Farbengebung des Raumes ergibt, da sich die Naturfarbe des Steins mit ihrem Korn ja doch nie genau wiedergeben läßt. Solche Farbengebung wirkt dann namentlich für Innenräume unbefriedigend, denn ein feineres Auge verlangt völlige Übereinstimmung oder gegensätzlichen bzw. harmonischen, jedenfalls aber bestimmten Kontrast. Nur so ist ein Verbinden oder Trennen, d. h. die Erzielung künstlerischer Wirkungen, möglich. Den erwähnten Mangel muß auch die Kunst der Renaissance wohl empfunden haben, denn sie hat wiederholt versucht, ihm durch teilweise farbige Behandlung des Steins zu begegnen. So sind in der Kapelle des Palazzo Ricardi in Florenz die berühmten Wandgemälde von Benozzo Gozzoli durch eine Sandsteinarchitektur in gelblichem Naturton eingerahmt, an der alle vorspringenden Glieder, Ornamente usw. vergoldet sind. Hier bildet die Naturfarbe des Steins nur einen neutral vermittelnden Ton, wie etwa ähnlich gefärbte Felderteilungsleisten zwischen den leuchtenden Farbenflächen orientalischer Teppiche. An anderen Orten sind durch dunkle Färbung der Relieftiefen mit oder ohne Vergoldung der Höhenpunkte gute Wirkungen erreicht. Von hier bis zur vollständigen Färbung des Werksteins ist nur ein Schritt, dem keinerlei grundsätzliche Bedenken im Wege stehen. Man sollte in der monumentalen Architektur, namentlich der Innenräume, zu dieser guten Kunstübung zurückkehren, wie sie unserer überlieferten deutschen Architektur zu allen

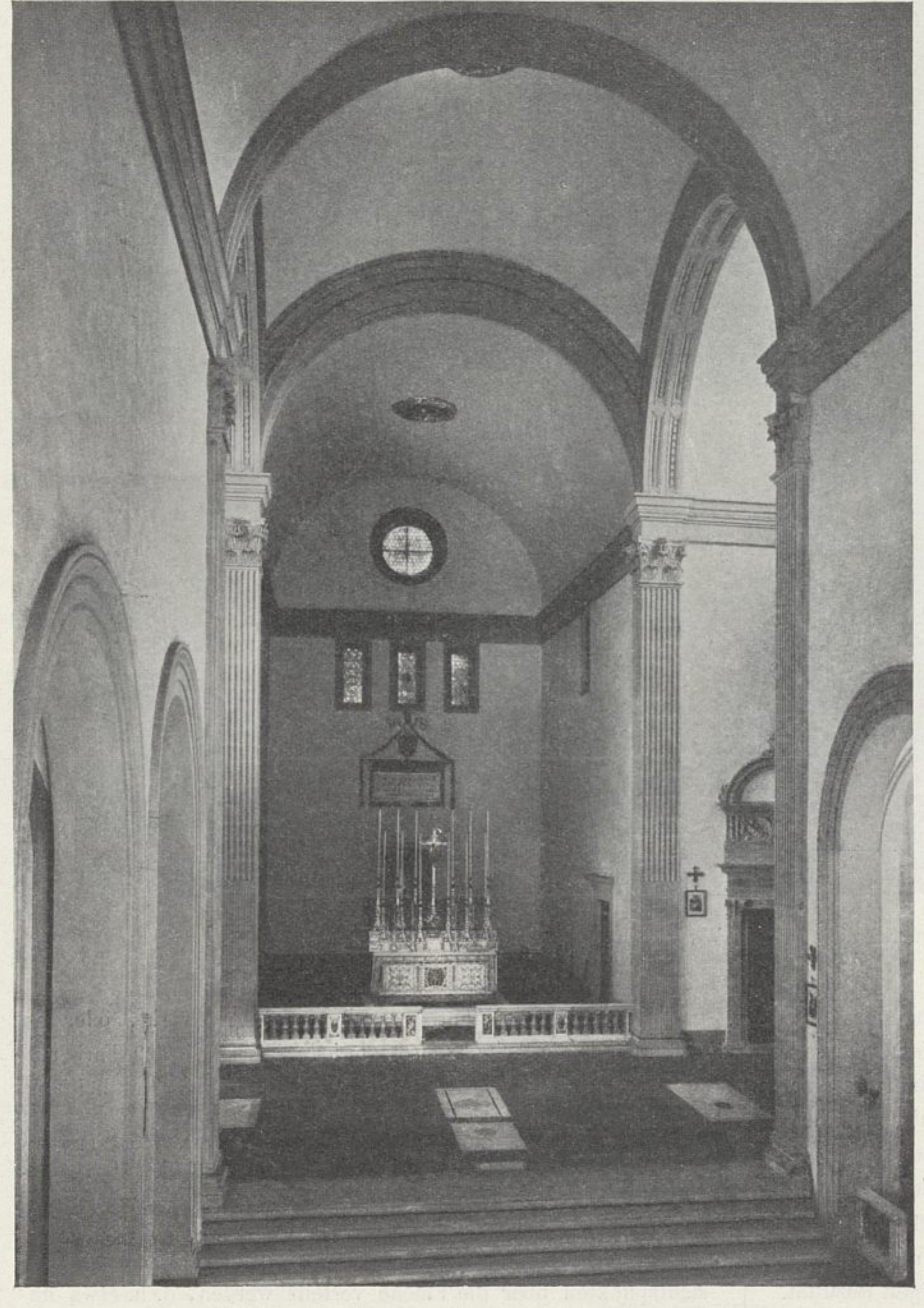


Abb. 14. Kirche der Badia in Fiesole (Brunellesco)

Zeiten selbstverständlich war. Hat doch gerade der Grundsatz, daß man Haustein in seiner natürlichen Zufallsfarbe zeigen müsse, so viele monumentale Räume unserer neueren Architektur zum guten Teil um ihre künstlerische Wirkung gebracht.

Anders, wo Baustoffe mit reicherer natürlicher Farbengebung zur Verfügung stehen. Da wächst die Freiheit der Ausdrucksmöglichkeiten. Hierher gehören namentlich die politurfähigen Gesteine Granit, Marmor, Alabaster und einige Kalksteinsorten. Zur Schönheit der Farben gesellen sich hier der Reiz der durch geschickte Bearbeitung, Politur usw. glänzend gemachten Oberfläche mit seinem wechselnden Spiel der Lichter auf Flächen und Gliederungen und die Schönheit der kräftigen natürlichen Aderung oder Musterung. Buntfarbiger Marmor wurde wohl zuerst in der römischen Kaiserzeit in größeren Mengen als kostbarer Ersatz für die bis dahin gemalten Farben angewendet, auch in der figürlichen Plastik. Einen vortrefflichen Gebrauch macht von der Marmorverkleidung der Flächen die Architektur der frühchristlichen Zeit und das frühe italienische Mittelalter, insofern große farbige Flächen der Raumgestaltung dienstbar gemacht und die durch andersfarbige Einlagen erzielten Felderteilungen nach tektonischen Gesichtspunkten angeordnet werden (Abb. 15). Auch die reichen Marmorverkleidungen der italienischen Spätrenaissance und des Barock gliedern sich zwar den architektonischen Ordnungen ein, erreichen aber selten die ruhige Klarheit der alten Werke, vielmehr schießt die Freude an der dekorativen Pracht des Marmors häufig weit über die Erfüllung der Aufgaben der Farbe für die Raumbildung hinaus. Als ein gutes Beispiel der Art sei die Kirche S. Ambrogio in Genua genannt. Den Maßstab für den Raum gibt eine große korinthische Pilasterordnung. Alle Wand- und Pfeilerflächen unterhalb des Sandsteingebälks sind mit weißem Marmor bekleidet, der für die (in der Fläche liegenden) Pilasterkanneluren, Felderteilungen, Schnörkel usw. schwarze und rote Einlagen erhalten hat. Vom Gebälk an aufwärts umrahmt die Architektur in den Farben Grau-Gold-Schwarz reiche Deckengemälde in kräftigen Farben — ein prächtiger, harmonischer Raum! Noch einheitlicher wirkt der kleine Raum des Marmorbades an der Orangerie in Cassel (um 1700). Hier werden Felder aus grünem, gelbem und violettem Marmor durch fein profilierte schwarze Marmorleisten von einem weißen Rahmenwerk getrennt, dazu treten reiche Relief- und Rundplastiken gleichfalls aus weißem Marmor. Die Farbenanordnung ist eine streng tektonische und verfehlt ihren Eindruck nicht (Abb. 16). Einige gute Bauten haben neuerdings großzügige Wirkungen durch Zusammenfassen größerer Wand- und Pfeilerflächen durch einheitliche Marmorverkleidungen erzielt, so der Erweiterungsbau der Universität München (Abb. 18). Allerdings ist solcher Schmuck sehr kostbar.

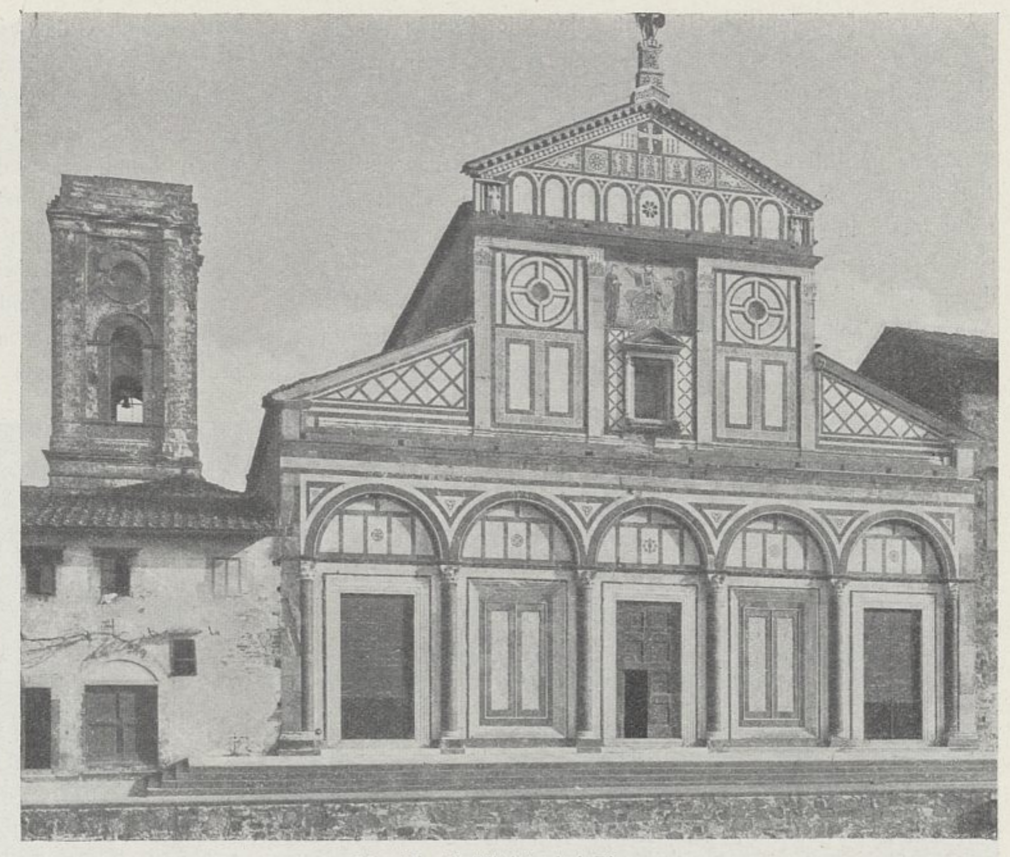


Abb. 15. S. Miniato bei Florenz.
Marmorverkleidung in Weiß und Dunkelgrün.



Abb. 16. Marmorbad in Cassel.

Der außerordentliche Einfluß, den die Freude an der Schönheit des Marmors überall geübt hat, tritt fast zu allen Zeiten hervor. Wo der teuere Baustoff nicht zur Verfügung stand, kehrte daher seine Erscheinung als Vorwurf für unzählige Wandmalereien von der Antike bis zur Barockkunst wieder. Namentlich die letztere scheut sich nicht (etwa in der Wiener Karlskirche), den für den Wandsockel verwendeten natürlichen Marmor in größerer Höhe durch Malerei so täuschend nachzuahmen, daß nur ein scharfes Auge die Nachahmung als solche erkennt: lediglich um die Einheit der farbigen Komposition zu wahren.

beläge und Pflasterungen für Fußböden ein Mosaik aus natürlichen oder künstlichen Steinen bedeuten. Die genannten Techniken verfolgen durchweg den Grundsatz, ausdrucksvolle gegebene Farbentöne zusammenzustellen und der architektonischen Komposition dienstbar zu machen. Das Verfahren eignet sich namentlich auch für Fußböden, die aus praktischen Gründen einen in der Masse gefärbten Stoff verlangen.

Wird das Holz als Konstruktionsmaterial heute mehr und mehr durch andere, namentlich feuerfeste Stoffe verdrängt, so spielt es als Verkleidungsmittel nach wie vor eine große Rolle. Auch hier sind es vornehmlich praktische

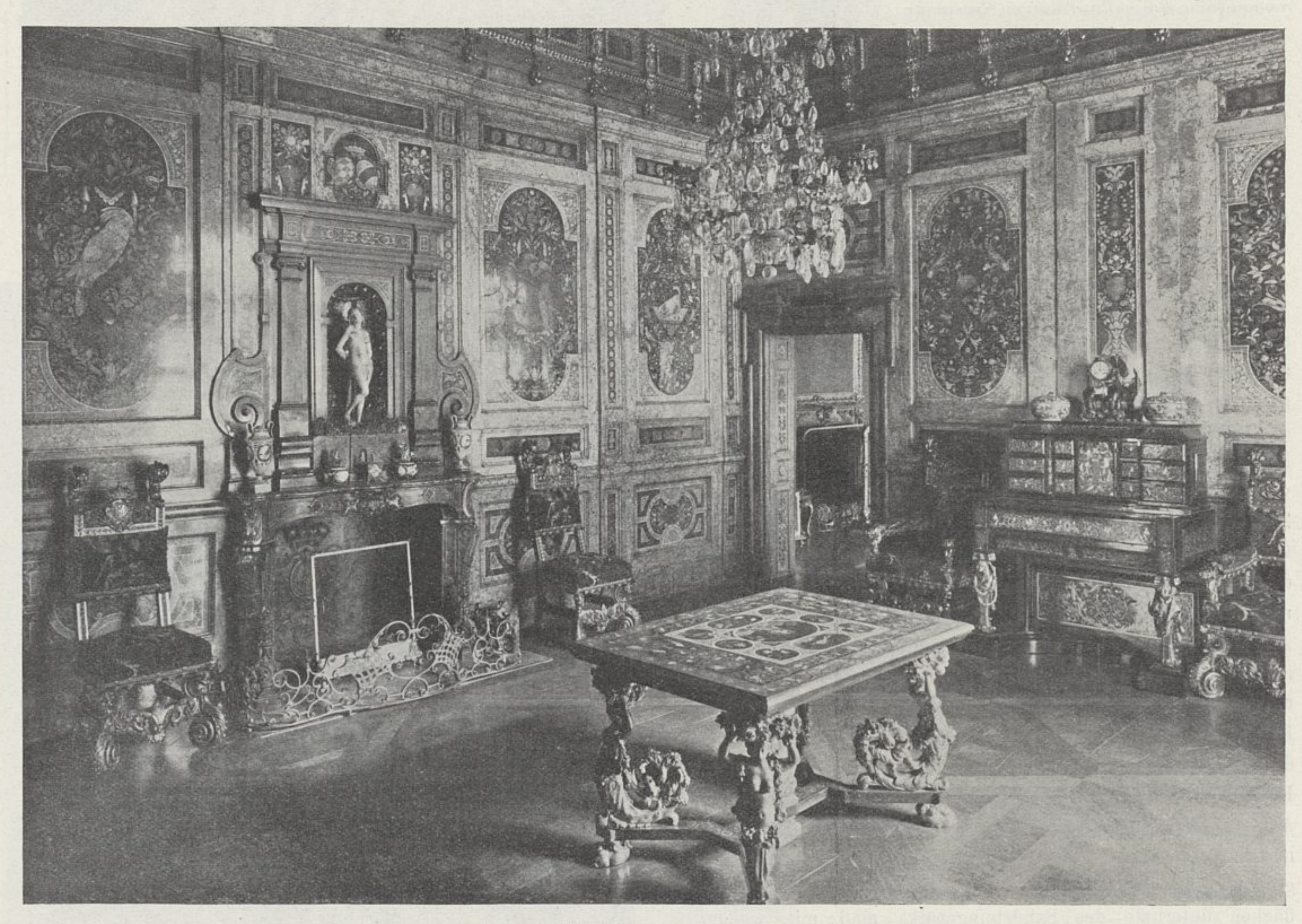


Abb. 17. Königliche Residenz in München.
Mosaikarbeiten in Stuccolustro und Marmor.

In dem Genueser und Casseler Beispiel fand sich zur Bereicherung schon ein starker Wechsel verschiedenfarbiger Marmorsorten, je nach den erstrebten dekorativen Wirkungen. Das Material gestattet eine Steigerung von der einfachsten Felderteilung bis zur reichsten musivischen Arbeit (Abb. 17).

Eingelegte Marmorarbeiten führen zum Mosaik aus natürlichen oder künstlichen Steinen (Glasflüssen). Namentlich letztere kommen der monumentalen Malerei sehr nahe und übertreffen sie noch teilweise vermöge ihrer prächtigen Leuchtkraft durch gesteigerte Wirkungsmöglichkeiten. Auch übt die wohlverstandene Technik dieser Arbeiten einen heilsamen Zwang in der Richtung monumentaler Behandlung der Dekorationen aus. Ein ähnliches gilt für die farbigen Glasfenster. Hierher gehören weiterhin die Terrazzo- und ähnlichen Techniken, die in der Hauptsache wie alle mehrfarbigen Platten-

Eigenschaften und die leichte Bearbeitungsmöglichkeit, die den Baustoff empfehlen und eine eigenartige Formgebung gestatten. Die Dauerhaftigkeit des Holzes wird durch geeignete schützende Überzüge oder Anstriche erhöht, denen gewöhnlich Farbe zugesetzt wird, da ohnehin der reine Naturton des Holzes für künstlerische Zwecke kaum in Frage kommt. Zur Behandlung werden entweder Wachs, Politur oder Lack, d. h. Stoffe verwendet, die den Holzton durchscheinen lassen, oder Beize und Lasurfarben, d. h. Stoffe, die nicht die Naturfarbe, wohl aber die Maserung des Holzes erkennen lassen, oder endlich deckender Anstrich mit Öl-, Kasein- oder sonstigen Farben, der auch die Maserung verdeckt. Die drei Behandlungsarten können auch in gewisser Weise vereinigt werden.

Die Freude an der schönen Maserung erlesener Hölzer hat zu den erstgenannten Behandlungsarten, und ferner neben

technischen Zwecken dazu geführt, schlichteres Holz mit einem Furnier aus einer kostbareren Sorte zu überziehen. Eine weitere Bereicherung bilden dann Furniereinlagen aus verschiedenen Holzarten und ornamentale Intarsien. Hierbei geht das Bestreben dahin, die natürlichen Farben und Maserungen der betreffenden Hölzer durch Beizen, Wachsen, Räuchern und Erhitzen und andere Maßnahmen möglichst zu steigern und ausdrucksvoll zur Geltung zu bringen. Unsere neuere Möbeltechnik hat auf diesem Gebiet, meist in Anlehnung an ältere Vorbilder, Vortreffliches geleistet. Es liegt auf der Hand, daß diese Behandlungsweise sich nur für intime Wirkungen: Möbel, Täfelungen, Türen, Decken in kleineren Räumen eignet, da die feineren Farbenunterschiede und Maserungen auf weitere Entfernung nicht mehr erkennbar sind. Bei monumentalen Räumen kommt es vielmehr lediglich auf Farbenwirkung im großen an. Hier werden daher geeignete Farbenanstriche am Platze sein, zumal bei ihnen die Farbenskala ganz unbeschränkt ist. Das Holz wird sich dabei stets durch seine Formgebung als solches genügend zu erkennen geben, vorausgesetzt, daß es in plastischer und konstruktiver Hinsicht seiner Eigenart entsprechend behandelt ist (Abb. 19 bis 21). Jedoch auch in kleinen Räumen wird gelegentlich Anstrich oder Bemalung des Holzes am Platze sein, namentlich wo ausdrucksvolle Holzsorten nicht zur Verfügung stehen, oder aus technischen Rücksichten verschiedene Hölzer (etwa Fichte und Eiche) verwendet worden sind, mit denen anders keine einheitliche Wirkung zu erreichen ist, oder wo besondere Farbenwirkungen erstrebt werden. Im Schloß in Ludwigsburg finden sich als bemerkenswerte Beispiele zwei benachbarte prächtige Räume, deren Wände und Decken durchweg mit Holz verkleidet sind und deren geviertförmige Grundfläche nicht mehr als 10 bis 12 qm messen mag. Das Holzwerk des einen ist braun gebeizt und durch dunkelbraune Leisten in Felder aufgeteilt, die mit kostbaren und außerordentlich schönen Einlegearbeiten übersponnen sind. Das Holzwerk des anderen ist mit Ölfarbe deckend gestrichen, und zwar die Füllungen schwarz in zinnoberrotem Rahmenwerk. Die Farbfelder werden durch Goldleisten geschieden, aus denen sich hier und da zierliches vergoldetes Rankenwerk über die schwarzen Flächen hin verzweigt. Diese sind zum Teil dekorativ mit Fruchtgehängen u. dgl. in zarten Farben bemalt. Die Decke schmücken schwarze Adler auf rot und goldenen Gründen. Trotz aller erlesenen Kostbarkeit und Feinheit der Hölzer und Intarsien im ersten Raum wird, rein als Kunstwerk betrachtet, der zweite Raum den Vorzug verdienen.

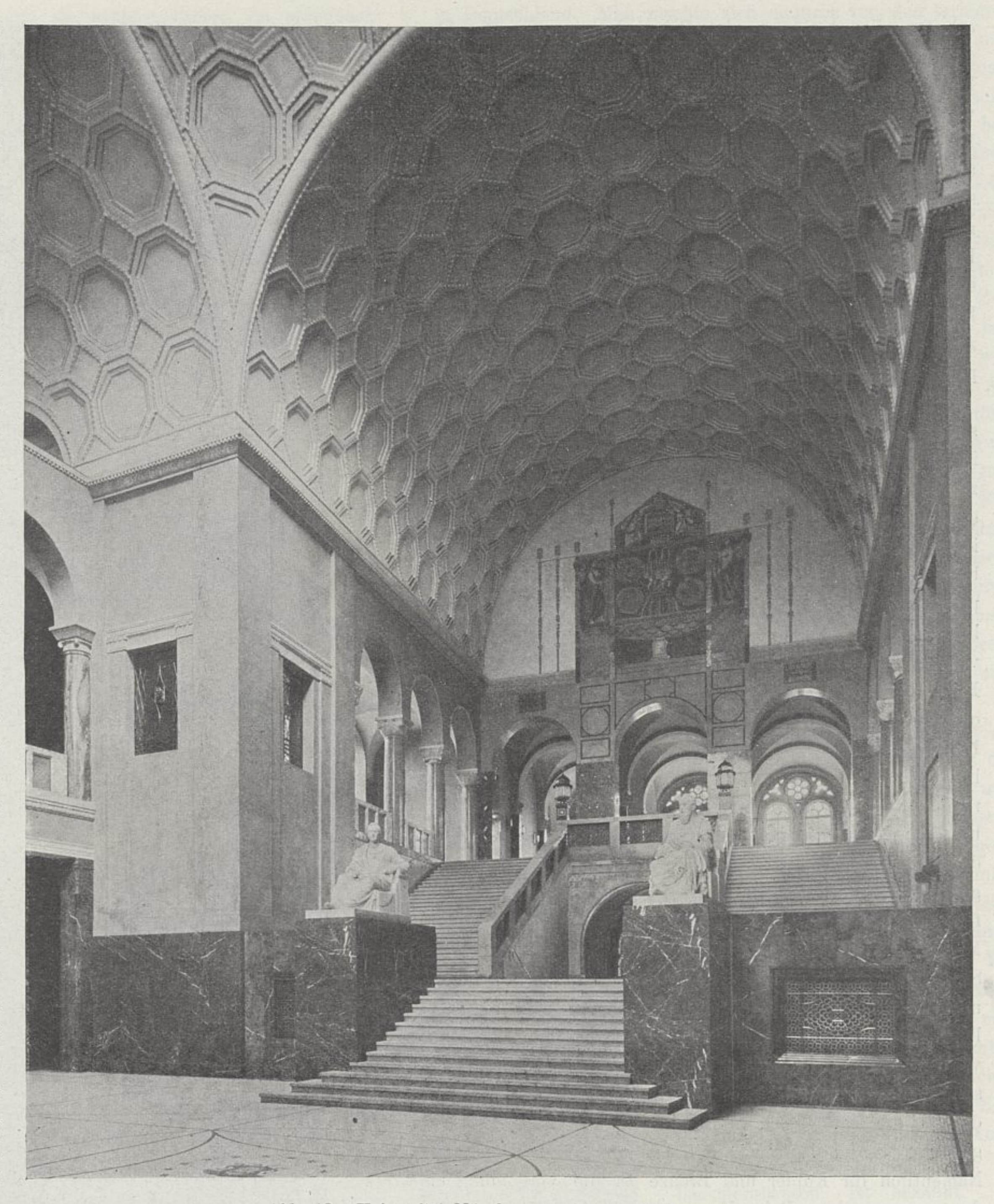


Abb. 18. Universität München. (Architekt H. Bestelmeyer.)
Marmorsockel dunkelgrün, geputzte Wandflächen elfenbeinfarbig.

Das in größeren Mengen für konstruktive Zwecke verwendete Walzeisen bedarf ebenso wie das für Schmiede-

arbeiten aller Art verwendete Schmiedeeisen, das Eisenblech, das Gußeisen eines Schutzüberzugs gegen Zerstörung durch Rost. Den wirksamsten Schutz bildet Ölfarbenanstrich. Soweit das Walzeisen, das organischer Verbindung und damit künstlerischer Verwertung so sehr widerstrebt, in der Architektur nicht schon aus praktischen Gründen ummantelt wird, sollten durch umfangreiche Verwendung von Eisenblechen nach Möglichkeit raumbegrenzende Flächen gebildet werden. Eine nackte Konstruktion wird an sich nie künstlerisch schön sein. Es kann sich nur darum handeln, sie durch geeignete Behandlung und Gliederung einer künstlerischen Idee dienstbar zu machen. Hierfür ist eine nach künstlerischen Gesichtspunkten durchgeführte Färbung hervorragend geeignet.

Bei Schmiedearbeiten ergibt das Abbrennen mit Öl eine schwarze Farbe, während der wirksamere Ölfarbenanstrich in der Farbenskala unbeschränkt ist. Andere Metalle, wie z. B. Zink, schützt ihr Oxyd vor weiterer Zerstörung, macht sie jedoch unscheinbar und unansehnlich, daher ist auch hier im allgemeinen ein Anstrich am Platze. Ansehnlich und bestimmt wirkt dagegen die grüne Kupferpatina, die sich unter günstigen Umständen von selbst einfindet oder auch künstlich hervorbringen läßt. Dekorativ geschätzt und wertvoll ist vor allem der metallische Glanz und Lichtreflex. Er wird durch künstliche Behandlung gefördert und erhalten oder abgestuft. Hierher gehört das Polieren, Beizen Ätzen, Brünieren usw., Behandlungsarten, durch die sich, namentlich bei der Bronze, sehr feine und intime Reize erreichen lassen. Die Oberfläche bedarf jedoch ähnlich wie bei den entsprechenden Behandlungsarten des Holzes meist der Unterhaltung und Pflege. Am dauerhaftesten und begehrtesten ist der Goldglanz. Da das Gold sich in sehr feine Plättchen ausschlagen läßt, spielt es als Überzug anderer Metalle und weiterhin auch anderer Stoffe (Holz, Stein, Stuck) die größte Rolle. Die an sich nicht blanken Stoffe müssen allerdings erst durch einen Kreidegrund oder ähnliche Mittel für die Aufnahme der Vergoldung geglättet werden. Sehr wichtig ist hierfür, daß das Gold vermöge seines metallischen Glanzes zu allen Farben gut steht und deshalb mit natürlichen Steintönen ebensogut in Verbindung gebracht werden kann wie mit den leuchtendsten Malfarben. Namentlich für Kupfer und Bronze ist die Vergoldung eine der monumentalsten Behandlungsarten, da in ihr die eigentümlichen künstlerischen Reize der Lichtspiegelung am schönsten und vor allem am dauerhaftesten zur Geltung kommen. Eine wichtige Rolle spielen ferner die auf galvanischem Wege hergestellten Metallüberzüge sowie das Verzinnen des Eisens, das den weißen Metallglanz am besten erreicht.

Ist bei den natürlichen Baustoffen die Farbe eine unbedingt gegebene, die nur vermittels verschiedener Oberflächenbehandlung mehr oder weniger zur Geltung gebracht werden kann, so liegt bei den künstlichen Baustoffen die Erzeugung der Farben bis zu einem gewissen Grade, oft sogar vollständig, in der Hand des Herstellers. Soweit diese Stoffe nur Massen bilden, die ihrerseits wieder verkleidet werden, scheiden sie bei dieser Betrachtung aus, so der gewöhnliche Mauerstein, der Zementstein oder der gewöhnliche Gipskörper. Soweit die Oberflächen sichtbar bleiben, oder die Stoffe selbst zur Verkleidung dienen sollen, geht das Bestreben dahin, die Masse oder wenigstens ihre Ober-

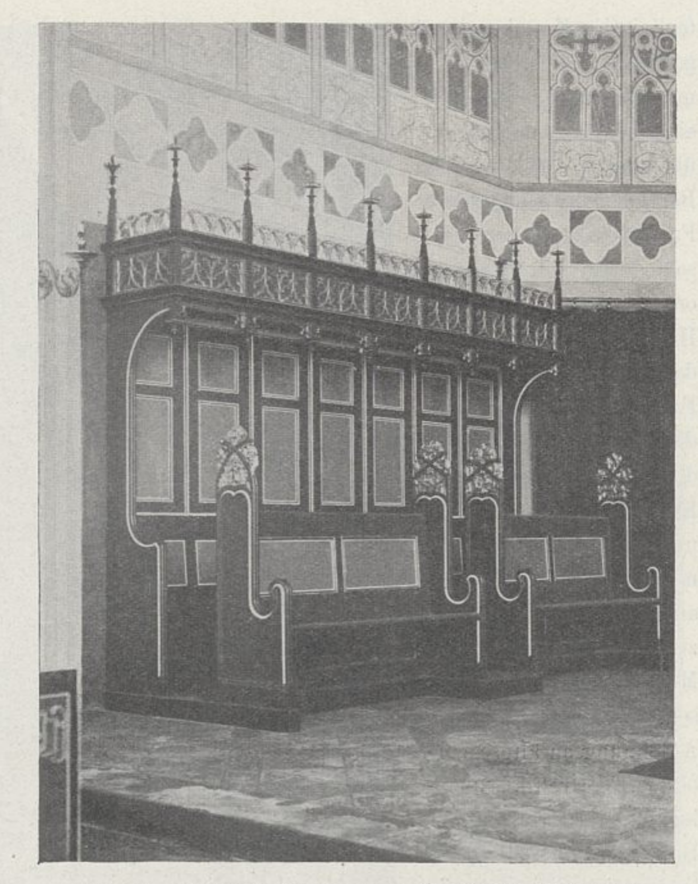


Abb. 19. Evangelische Kirche in Neustadt i. Westpr.*)
Holzwerk mit deckendem Anstrich und Vergoldung.
(Abb. 2 u. 19. Königl. Preußische Bauverwaltung. Örtliche Bauleitung: der Verfasser.)

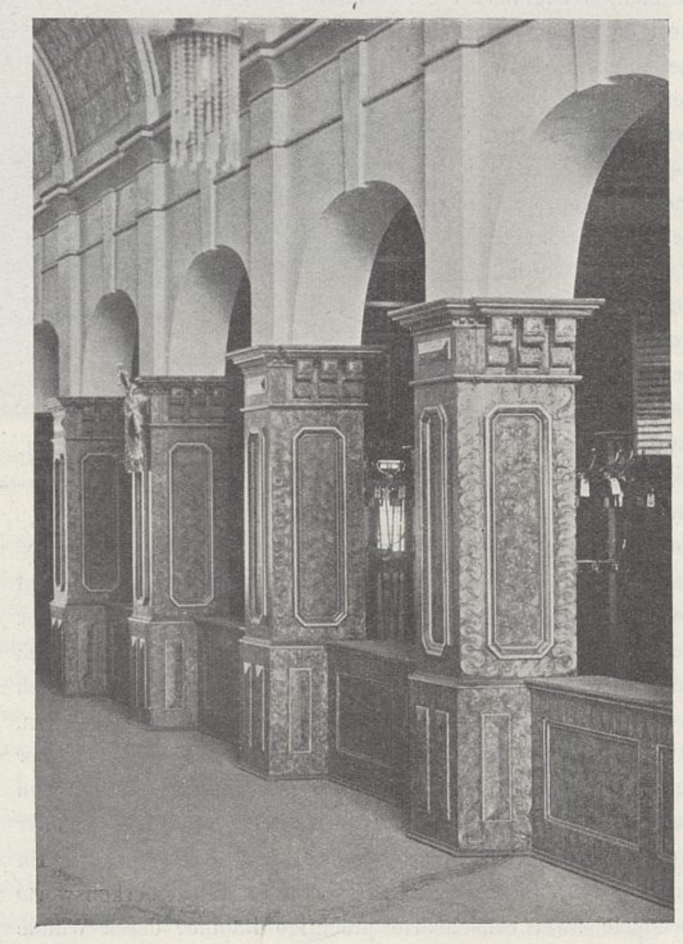


Abb. 20. Kurhaus in Zoppot.*)
Holzwerk mit deckendem Anstrich und Lasur.

*) Abb. 2, 19, 20, 25 u. 26 Maler Ernst Fey, Berlin.

haut so zu bilden, daß sie schöne Farben (in möglichst großer Skala) und reizvolle Oberflächenbeschaffenheit (Körnung, Glanz u. dgl.) mit möglichster Widerstandsfähigkeit verbindet. In den meisten Fällen stellt hier die Industrie dem Architekten eine mehr oder minder große Auswahl zur Verfügung, aus der er das für seine Zwecke Brauchbare aussuchen muß. Von einer eigentlichen Zusammenstimmung an Ort und Stelle muß also gewöhnlich abgesehen werden. Die Entwicklung der heutigen Industrie und die Leichtigkeit des Güterverkehrs haben die Auswahl guter künstlicher Stoffe wesentlich bereichert.

Gebrannter Ton tritt in größeren Mengen im Backsteinrohbau zutage. Frühere Zeiten stellten die Flächen und Profilierungen durch Handstrich recht und schlecht her, so sauber es ihnen glücken wollte, und versahen sie dann mit einem dünnen Putzüberzug und Anstrich, oder nur mit einem Farbenüberzug, der die Ungleichmäßigkeiten der Farbe des Materials ausglich, und dann je nach Bedarf mit aufgemalter Fugenteilung, abgesetzten Teilungen oder auch gar nicht weiter geschmückt wurde. Das war der Brauch in Oberitalien wie in Deutschland. Man machte sich dadurch von den farbigen Eigenschaften des in der Umgegend anstehenden Tones und den Zufälligkeiten des Brandes unabhängig. Erfordert doch gerade die schwere und oft grelle Naturfarbe des Backsteins besondere Vorsicht bei ihrer Verwendung und besondere Rücksicht auf die Farben der Umgebung. Daher werden die neueren Backsteinbauten, soweit sie diese Rücksicht nicht üben, so besonders häufig im künstlerischen Sinne als roh empfunden. Doch sollte es heute in den meisten Fällen möglich sein, eine dem jeweiligen Bedarf entsprechende Naturfarbe zu finden, namentlich, wenn eine geeignete Zusammenstellung mit Putz- oder auch Werksteinflächen bewirkt wird, wobei dann ähnliche Gesichtspunkte gelten wie bei der Zusammenstellung von Werkstein und Putz. An Bestimmtheit und Mannigfaltigkeit werden die Backsteintöne denen des Werksteins gewöhnlich überlegen sein. Die Ausdrucksmöglichkeiten sind daher, wie unzählige Beispiele aus alter und neuer Zeit zeigen, außerordentlich groß. Für Innenräume eignet sich Backsteinrohbau in der Regel nicht, da die verfügbaren Naturfarben des Steins meist zu schwer und hart wirken und mit anderen Tönen nicht zusammengehen, eine einheitliche Wirkung mithin stören. Nur der Fußboden verträgt hier und da so schwere Farben.



Abb. 21. Kurhaus in Zoppot. Wandelhalle.
(Architekt Karl Weber.)

Das vorzüglichste Ausdrucksmittel des gebrannten Tones ist die Glasur. Glanz, Farbenpracht und -reichtum, Dauerhaftigkeit, Abwaschbarkeit sind ihre begehrten Eigenschaften, gebrannter Ton mannigfachster Art, Fliesen, Kacheln, Steinzeug, Fayence, Porzellan ihre Träger. Da Hochglanzglasuren sich zur Bekleidung größerer Flächen naturgemäß weniger eignen, so beschränkt sich ihre Verwendung mehr auf schmückende Belebung stumpfer Flächen und Betonung ausgezeichneter Stellen. Die prächtig bereichernde Wirkung glasierter Maßwerke und Friese bei Backsteinbauten ist bekannt. In Mecklenburg, wo nur ein unscheinbares Backsteinmaterial von blaßgelber Farbe zur Verfügung stand, ließ man an einer Reihe von Monumentalbauten zwei bis drei Schichten dieser Backsteine mit ebensoviel grün glasierten Steinschichten wechseln. Ein Ofen aus glasierten Kacheln steht gut auf einer stumpfen Wandfarbe. Die Farbenskala der Glasuren ist recht groß und ermöglicht reiche Wirkungen durch Zusammensetzung verschiedenfarbiger Platten oder durch Aufbringung verschiedener Glasuren auf ein Stück, mag es eben oder reliefgeschmückt sein. So zeigen alte Öfen weiße Figuren

und plastische Dekorationen auf blauen, grünen oder violetten Gründen. Die wundervollen Werke der della Robbia, die aller Farblosigkeit der derzeitigen Skulptur zum Trotz an einer monumentalen Farbengebung festhalten, fußen auf dem gleichen Grundsatz (Abb. 24). Moderne Majoliken und andere keramische Erzeugnisse haben durch eigenartige, namentlich auch stumpfe Glasuren, die Auswahl geeigneter Fabrikate heute sehr vergrößert, so daß der Baustoff dadurch auch für die Bekleidung größerer Flächen geeignet wird und eine große Zukunft zu haben scheint (Abb. 22 u. 23). Bei der Gelegenheit mag an die reiche keramische Kunst des Orients erinnert werden, deren Anfänge auf die assyrische und ägyptische Kunst zurückgehen, und die mit ihren Schmelzglasuren, ihren Mosaiken aus glasierten Tonplatten, ihren Lüsterfliesen und farbigen Glasurmalereien namentlich in Persien und der Türkei klassische Werke farbenprächtiger Wandbekleidung geschaffen haben. Wenn die Überlieferung unserer Kunst an diese Leistungen auch keine unmittelbare Anknüpfung findet, so stehen sie doch anderseits unserer den Flächenschmuck liebenden Zeit im Grunde recht nahe.

Einen breiten Raum nehmen in der Baukunst alle die Stoffe ein, bei denen Kalk, Zement und Gips das Bindemittel für Sand, Kies oder Steinbrocken mehr oder minder feinen Korns bildet. Sie kommen hier in Betracht, soweit sie am Bauwerk sichtbar bleiben. Da sie meist an der Verwendungsstelle selbst hergestellt werden, lassen sie sich dem örtlichen Bedürfnis besser anpassen als die Stoffe, die die Industrie fertig liefert. Die Farbe entsteht durch entsprechende Auswahl der Rohstoffe (farbige Gesteine usw.), durch Farbenzusatz zum Bindemittel vor der Herstellung, oder durch nachträglichen Anstrich in feuchtem oder trockenem Zustande. Der in praktischer Hinsicht so brauchbare Portlandzement hat sich einerseits durch seine unscheinbare Farbe, anderseits durch seine zersetzenden Auswitterungen bisher vielfach als Feind der Farbe gezeigt, doch gelingt es vielleicht mit der Zeit, hierin Wandel zu schaffen. Die außerordentliche Entwicklung, die die Zementbetonbauweise in neuerer Zeit erfahren hat, beruht nicht nur auf ihrer durch die Einlage von Eisen gesteigerten konstruktiven Leistungsfähigkeit, sondern zum guten Teil auch auf der Möglichkeit, die Verkleidungsstoffe mit dem Kern bequem und praktisch zu verbinden. Alle Befestigungsvorrichtungen (Eisen, Dübel, Klammern) können mit Leichtigkeit eingestampft werden, vor allem aber läßt sich der Oberhaut des Betons durch Zusatz entsprechender Gesteine, Kiesarten usw. ein derartiges Ansehen geben, daß sie bei guter Ausführung und namentlich bei nachträglicher steinmetzmäßiger Bearbeitung an Ausdrucksfähigkeit dem Werkstein oft nur wenig nachsteht. Das gilt namentlich, seit man es aufgegeben hat, „Kunststeine“ herzustellen, d. h. natürliche Gesteine nachzumachen, vielmehr sich bemüht, die Eigenschaften des Baustoffes aus seiner Technik heraus zu entwickeln. Eine Anzahl neuerer Bauten lassen die Vorzüge einer einheitlichen Fassadenbehandlung in solchem Material deutlich erkennen. Es ist wohl zu erwarten, daß die farbigen Ausdrucksmöglichkeiten der Technik noch einer wesentlichen Steigerung fähig sind. Das wäre zu begrüßen, denn die Zusammenstellung von Vorsatzbetonflächen, namentlich in Innenräumen, mit anderen natürlichen und gemalten Farben hat bisher wenig befriedigende Wirkungen ergeben.

Der althergebrachte Mörtelverputz behält daneben für die Verkleidung der Backstein- und Bruchsteinflächen sein gutes altes Recht, das ihm auch die meist durch farbiges Steinmehl gefärbten sogenannten Edelputze nicht haben rauben können Er besitzt je nach der Ausführungsart, dem Korn und der Farbe der verwendeten Stoffe die mannigfachsten Ausdrucksmöglichkeiten und ist vor allem für Wandanstrich und Wandmalerei der gegebene Untergrund, der stets nach dem jeweiligen Bedarf besonders zubereitet werden kann. Namentlich in frischen Putz dringen die Farben so tief ein, daß sie unbedenklich dem Angriff der

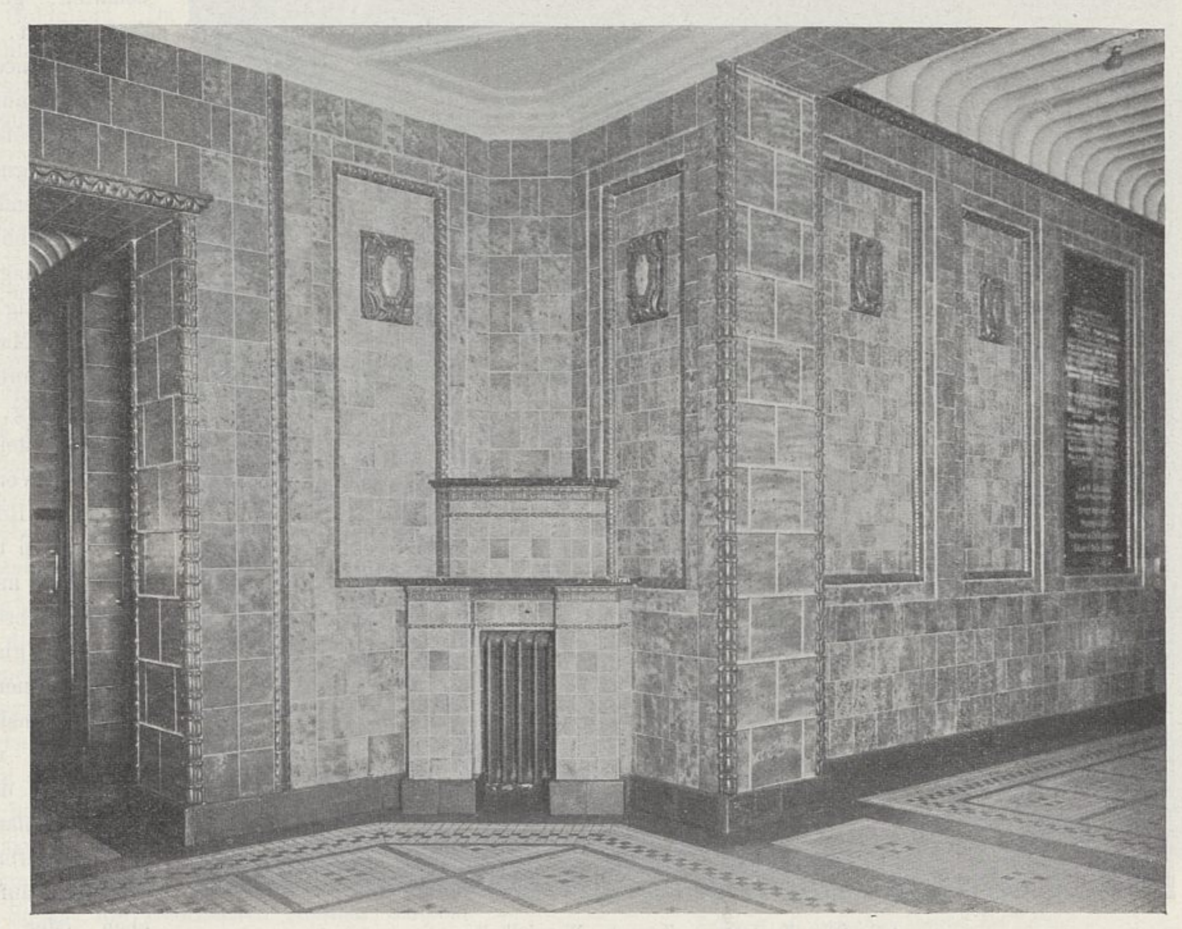


Abb. 22. Kaufhaus Barkhof in Hamburg. (Ausführung: Villeroy u. Boch, Mettlach.)

Witterung ausgesetzt werden können. Darauf beruht bekanntlich die Dauerhaftigkeit der Al-fresco-Malerei.

Großer Farbenwirkungen sind die in der Masse gefärbten Gips- und Stuckarbeiten, denen auch Marmorstaub und andere Stoffe zugesetzt werden können, fähig. Hierher gehören die verschiedenen farbigen Estrich- und Terrazzoausführungen mit und ohne Verwendung von Steineinlagen. Ferner die geglätteten oder polierten Stuccolustro-Arten, in denen es die Barockzeit zu so großer Meisterschaft gebracht hatte. Auch frisch aufgebrachter und gebügelter Farbenanstrich ergibt gute eigenartige Wirkungen. Die mannigfachen Techniken dieses großen Gebietes sind zurzeit als „Surrogate“ für echte Baustoffe zu Unrecht teilweise in Verruf geraten. Sie vermögen sich auch ohne Nachahmung natürlicher Gesteine durchaus selbständig zu behaupten und besitzen den sehr großen Vorzug, daß ihre ausdrucksvolle und weiche Farbengebung vortrefflich mit gemalten Farben zusammengeht, weit besser und einheitlicher als die meisten natürlichen Baustoffarben. Darauf beruht neben den praktischen Vorzügen denn auch ihre große Beliebtheit in der Kunst des Barock.

Die eigentlichen Wandbekleidungs- oder Dekorationsstoffe im engeren Sinne können hier nur gestreift werden. Zunächst spielen eine Reihe neuerer Erzeugnisse der Industrie, wie Linoleum, Linkrusta u. dgl., namentlich in der Wohnungsausstattung eine Rolle. Sie sind bei der Herstellung in der Masse gefärbt, einfarbig oder gemustert, praktisch und in der Skala der Farbengebung fast unbeschränkt. Ferner kommen Tapeten und Gewebe in Betracht. Die Tapete bietet einen fabrikmäßig hergestellten billigen Ersatz für Wandbemalung, der gleichzeitig dem Wandverputz einen gewissen Schutz gewährt. Bei ihrer Verwendung liegt die Gefahr nahe, im Reichtum der Dekoration weit über das Bedürfnis hinauszugehen und eine ausdrucksvolle Musterung zu wählen, wo ein schlichter Farbenton dem künstlerischen Zweck vollauf genügen würde. Gewebe werden im Garn oder im fertigen Stoff gefärbt, in Mustern gewebt oder auch bei Einfarbigkeit mit einem Flächenmuster bedruckt, bzw. mit der Hand schabloniert. Soweit sie zur Wandbespannung verwendet werden, erfüllen sie den Zweck der Tapeten. Sie bilden bei ihrer großen Mannigfaltigkeit namentlich für intimere Wirkungen einen überaus dankbaren Stoff.

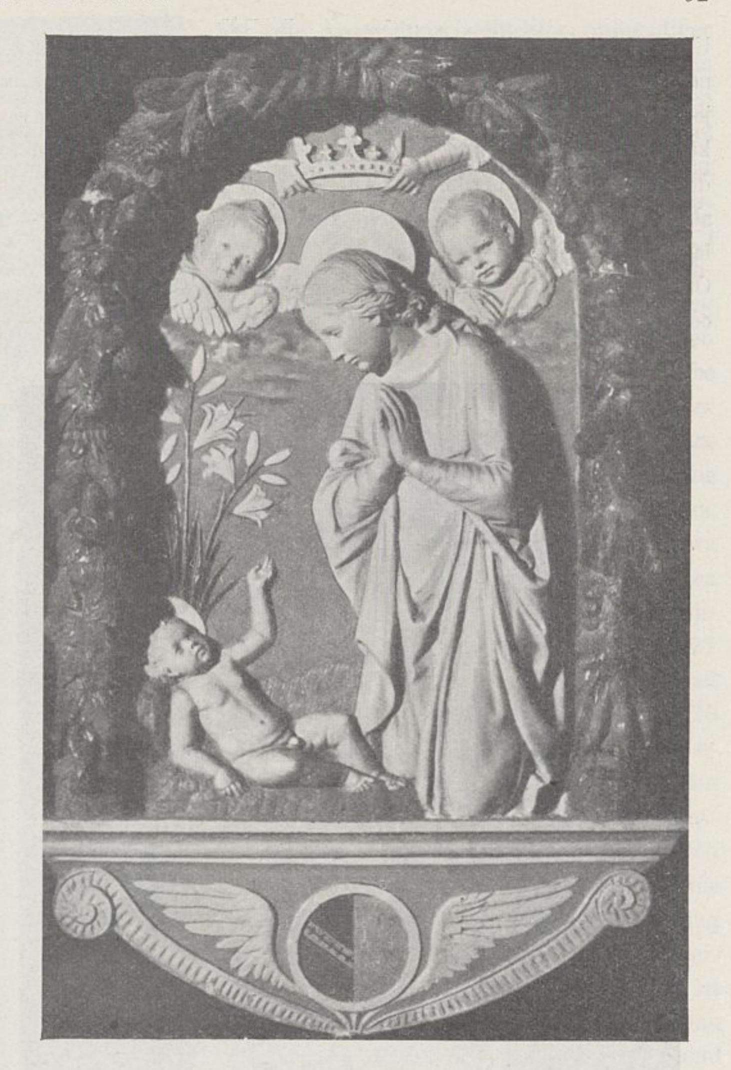


Abb. 24. Glasierte Tonplastik des A. della Robbia.
Hauptfarben Weiß und Blau, für den Rahmen Grün und Braun.



Abb. 23. Vorhalle des Dresdener Hauses auf der Internationalen Baufachausstellung in Leipzig. (Architekt O. Hempel.)

IV.

Bei dem Überblick über die Stoffe, die am fertigen Bauwerk hauptsächlich in die Erscheinung treten, erhebt sich die Frage: Wo ist ein eigentlicher Farbenanstrich oder eine Bemalung der Bauglieder am Platze? Ihre Beantwortung wird in jedem Einzelfalle das Ergebnis praklischer und künstlerischer Erwägungen sein und immer zu der Hauptfrage führen: Mit welchen Mitteln ist der Kompositionsgedanke am besten zu verwirklichen und am zweckmäßigsten durchzuführen? Ganz abgesehen von den Fällen, in denen praktische Rücksichten einen Farbenüberzug verlangen, hat die

Untersuchung der Baustoffe ergeben, daß nur ein Teil der natürlichen oder künstlich erzielten Stofffarben, und eine jede wiederum nur an bestimmten Punkten geeignet ist, den künstlerischen Zwecken zu genügen, d. h. die der Farbe in der Komposition zufallenden Aufgaben zu erfüllen. Überall also, wo solche Baustoffe nicht zur Verfügung stehen, verlangt das künstlerische Bedürfnis ihre künstliche Färbung. Ob wenige oder viele Farben angewendet, ob sie kräftig oder milde gestimmt werden, ob einfach oder reich unterschieden, das sind Fragen untergeordneter Bedeutung, abhängig vom Zeitgeschmack und der Fähigkeit und dem Empfinden des Einzelnen. Stets aber müssen, sofern von Kunst die Rede ist, die Farben besonnen verteilt werden, so daß eine zugrunde liegende bewußte Absicht zum bestimmten Ausdruck gebracht wird.

Bei der Frage nach der Art der Bemalung handelt es sich darum, ob sie eine vollständig deckende ist, wie beim Ölfarbenanstrich des Eisens oder bei der Zusammenfassung verschiedener Baustoffe durch einen Farbenüberzug, etwa bei dem oben erwähnten Beispiel des Fensters, oder aber ob die Farbenbehandlung nur die Aufgabe hat, besondere Eigenschaften bestimmter Stoffe hervorzuheben und herauszuarbeiten, wie etwa beim Beizen gemaserter Hölzer. Im letzten Falle tritt die farbige Behandlung technisch gleichsam in eine dienende Stelle zum Baustoff, sie muß sich seinen stofflichen Eigenschaften fügen und unterordnen. Solche Fälle fanden bereits bei Betrachtung der einzelnen Baustoffe Erwähnung. Sie setzen eine Menge bestimmter handwerklicher Kenntnisse und Geschicklichkeiten voraus und umfassen nicht nur den eigentlichen Farbenauftrag, sondern auch chemische Verfahren, wie das Behandeln mit Säuren, und besondere handwerkliche Übungen, wie das Schleifen und Polieren.

Ist die Bemalung eine vollständige, wie beim deckenden Ölfarbenanstrich des Eisens und des Holzes, so spielen die Rücksichten auf den Träger der Farbe nur eine geringe Rolle. Der Stoff, dem die Farbe aufgetragen wird, muß hier dem konstruktiven Zweck genügen, und vor allem muß die Form ihm entsprechen, d. h. der Umriß, die Dimensionierung, das Relief, die Technik der Bearbeitung und Formung müssen gemäß den Eigenschaften des Stoffes entwickelt werden und werden den Stoff damit als solchen genügend kennzeichnen. Die überlieferte deutsche Kunst hat sogar oft darauf verzichtet, für die Oberfläche eine eigens dem betreffenden Baustoff zukommende Behandlung zu wählen, hat vielmehr diese dem Farbenanstrich angepaßt. So genügte etwa bei Holzschnitzereien der Schnitt des Meißels an Feinheit dem Künstler nicht, man glättete die Oberfläche erst mit einem feinen blanken Kreidegrund, der namentlich bei Säulen u. dgl. zuweilen auf eine Leinewandumkleidung aufgebracht wurde. Die gleiche Auffassung fanden wir in der



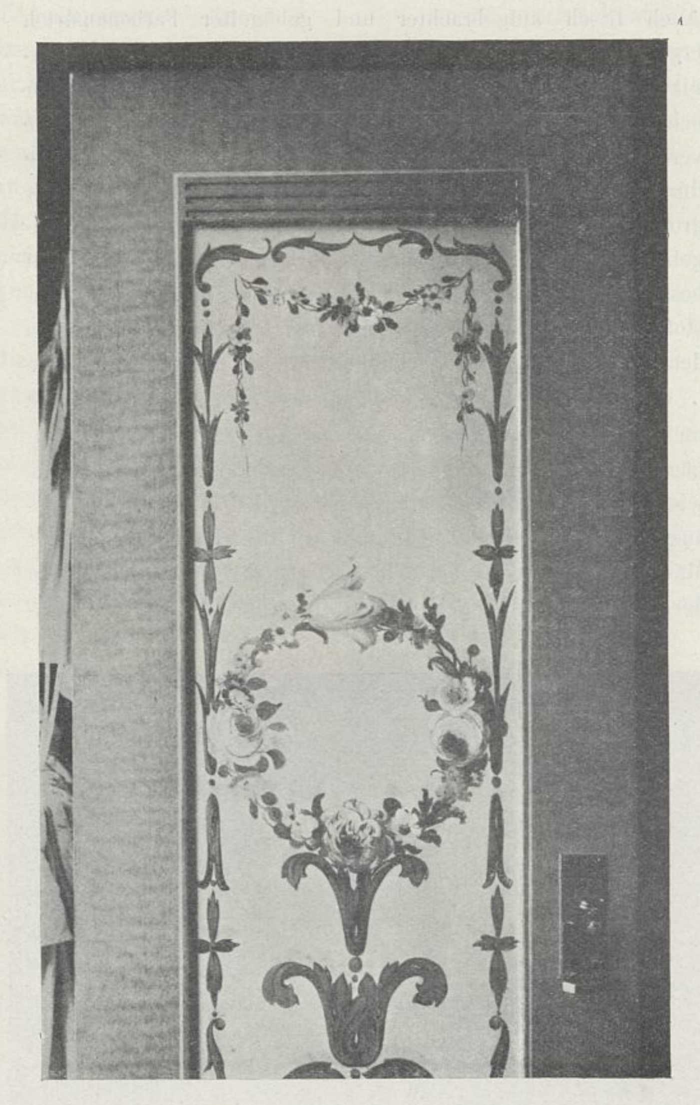


Abb. 25. Hellgrauer Ölfarbenanstrich mit dunkelgrauer Lasur.

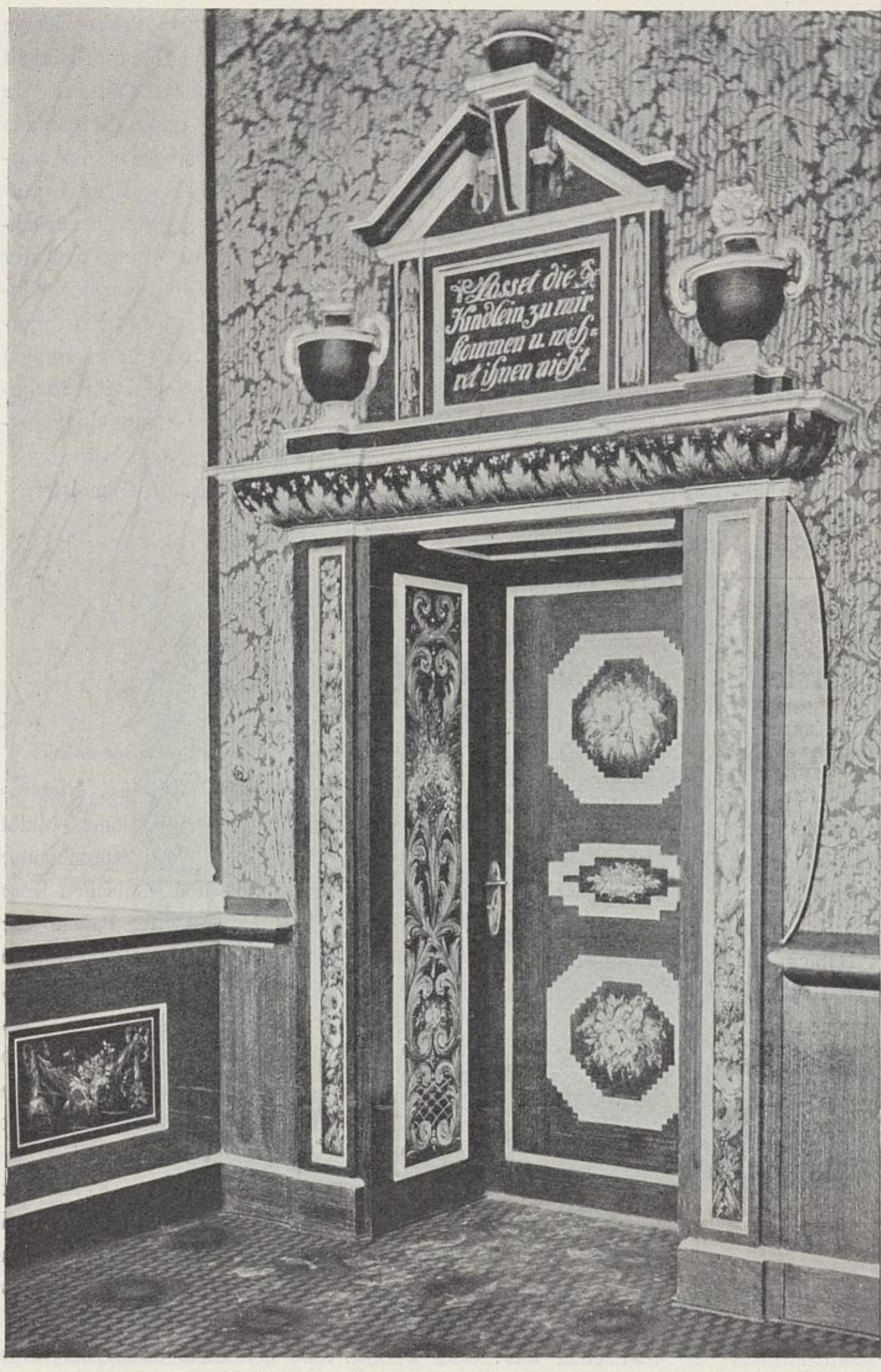


Abb. 26. Seminar in Rotenburg a. d. F.
(Königl. Preuß. Bauverwaltung. Örtliche Bauleitung: F. Hoßfeld.)

antiken Kunst. Jedenfalls ist der Anstrich stoffgerecht, wenn er maltechnisch richtig ist, d. h. die Gesetze des Farbenstoffes und des Pinsels erfüllt. Hier waren in der theoretisierenden Zeit des Klassizismus und der Folgezeit die guten alten Handwerksübungen wie in vielen anderen Zweigen so auch im Malerhandwerk teils aufgegeben, teils vergessen worden. Das gilt sowohl für die haltbaren alten Bindemittel wie für die Pinselführung. Will es doch heute noch kaum glücken, namentlich auf Stein, einen Außenanstrich herzustellen, der der Witterung annähernd so standhält, wie es die Arbeiten des Mittelalters und der Barockzeit taten und zum Teil heute noch tun, und wie ihn jeder tüchtige Dorfmaler damals vermöge der ihm überlieferten Kunstübung auszuführen vermochte. Ähnliches gilt von einer geschickten Pinselführung. Hier hat die Schablone, die bei richtiger Behandlung und am gehörigen Ort gewiß ihr gutes Recht hat, die Anwendung schlichter freihändiger Arbeit und damit auch die Fähigkeit, sie auszuüben, stark verdrängt. Mit Staunen sehen wir an Werken der Barockzeit, welche reichen Ausdrucksmöglichkeiten ein schlichter Ölfarbenanstrich etwa durch geschickte Ausnutzung der Technik des Lasierens gewinnt.[4]) Schon das Durchscheinen der Grundanstrichfarbe durch den durch die Pinselführung bestimmt und ausdrucksvoll gekennzeichneten Lasuranstrich gibt eigenartige Werte an Farbe und Zeichnung. Nicht das Nachahmen einer Holzmaserung macht den Anstrich des Holzes stoffgerecht, sondern die Anpassung an die Technik und Ausdrucksweise des Malers, wobei die Holzmaserung unbedenklich, etwa für eine wellige Pinselführung in bestimmten Richtungen, das frei behandelte und stilisierte Motiv hergeben kann (Abb. 20, 21 u. 25). Diese guten alten Malweisen sind sehr mannigfaltig. Bei dem in Abb. 26 dargestellten Beispiel ist ein durchscheinender schwarzer Lasurton auf einen weißen Grund gebracht und teilweise wieder ausgewischt, so daß der weiße Grundanstrich an diesen Stellen wieder sichtbar wird, eine Technik, die durch geschickte Ausführung bei einfachsten Mitteln geradezu überraschende Ergebnisse liefert. Freilich ist nicht jeder Anstrich überall am Platze. Wenn heute dem Beschauer eine mit glänzend lackierter, vielleicht noch grell bunter Ölfarbe gestrichene Steinputzfassade als Wiederbelebungsversuch alter Fassadenbemalung vorgesetzt wird, so ist es kein Wunder, wenn er sich enttäuscht abwendet. Glanzlichter wollen vorsichtig verteilt sein. Für Putz, Stein und Stuck werden Mineral- und Kalk-, im Inneren auch Kasein- und Leimfarben wegen ihres stumpfen Tons geeignet sein. Andere Materialien vertragen andere Farben. Beispielsweise prangten die alten Kupferdächer, die uns jetzt durch das schöne Zufallsgrün ihrer Patina entzücken, meist in Ölfarbenanstrich, nicht selten mit bereichernder Dekorationsmalerei.

Das allmähliche Wiederaufleben einer gediegenen Malweise und ein folgerecht durchgeführtes Beiseitelassen der vielen unechten und minderwertigen Farbenstoffe, die heute auf den Markt kommen, werden wesentlich dazu beitragen, die gemalte Farbe wieder mehr zu Ehren zu bringen. Gibt sie doch dem Architekten eins der wesentlichsten Mittel an die Hand, den Baustoff der künstlerischen Komposition dienstbar zu machen. Dieser läßt sich in farbiger Hinsicht am freiesten genügen, wenn an Ort und Stelle im weiß grundierten Raum die Farbentöne nach Bedarf angesetzt und gegebenenfalls aus ihnen eine reichere dekorative Malerei

4) Gute Beispiele in F. Zell, Bauernmöbel aus dem bayerischen Hochland.

harmonisch entwickelt werden kann. Gerade einfachen ruhigen Wirkungen sind die natürlichen vielfach gebrochenen Halbtöne der Baustoffe leicht hinderlich. In solchem Falle ist es stets künstlerischer, ein Material, dessen Ton die Farbengebung des Raumes stört, zu färben oder zu verkleiden, als es in seinem Naturton stehen zu lassen, auch wenn es an sich kostbar sein sollte.

Der Farbengebung unserer heutigen Architektur fehlt in hohem Maße das Monumentale. Wohl taucht auf anderen Gebieten wieder das Bestreben auf, große einfache Farbenakkorde zur Wirkung zu bringen, so beispielsweise in der Damenkleidung, guten Reklameplakaten, Schaufensterdekorationen usw., und der Zug unserer Architektur geht mit Entschiedenheit ins Einfache und Große. In der Farbengebung ist dieser Schritt noch nicht getan, man bleibt vielfach theoretischen Bedenken zuliebe an kleinlich differenzierten Farbennuancen hängen oder sucht bei düsterer Eintönigkeit das Ausdrucksmittel der Farbe ganz auszuschalten. In erfrischendem Gegensatz dazu stehen die guten Leistungen der modernen Wohnungsausstattung. Sie haben in der Ausnutzung der Farbe für intime Raumwirkungen Erfolge aufzuweisen, gegen die die Monumentalkunst noch weit zurückbleibt. Für die monumentale farbige Behandlung größerer Bauaufgaben stehen die großzügigen Leistungen der geschichtlichen Kunst, namentlich der Barockzeit, als noch unerreichte Lehrmeister da. Eine Anwendung dieser Farbenkunst auf unsere großartigen modernen Konstruktionen für Raumgestaltung und Raumüberspannung würde bedeutende künstlerische Wirkungen versprechen.

Geßner, Regierungsbaumeister.

Die Wiederherstellung des Domes in Trier.

(Mit Abbildungen auf Blatt 6 bis 11 im Atlas.)

Im Jahre 1911 sind die Wiederherstellungsarbeiten, die in den letzten drei Jahrzehnten am Trierer Dome vorgenommen worden sind, zum Abschlusse gelangt. Sie bilden das letzte Glied einer Kette von Arbeiten an dem Bauwerke, deren Beginn schon in den Anfang des vorigen Jahrhunderts anzusetzen ist und die wegen des hohen Denkmalwertes des Domes und in Anbetracht der wechselvollen Entwicklung der Baukunst sowie insbesondere der Denkmalpflege im vergangenen Jahrhundert die Beachtung weiter Kreise verdienen.

Zur Beurteilung der Wichtigkeit und Schwierigkeit der Wiederherstellungsarbeit ist es notwendig, deren eigentlicher Darstellung einen kurzen Abriß der Baugeschichte des Domes nebst einer Beschreibung des Bauzustandes, wie er sich bei dem Beginne der Wiederherstellung vorfand, vorauszuschicken.[1])

Der Trierer Dom, dessen Ursprung bis in das dritte Jahrhundert der christlichen Zeitrechnung zurückreicht, hat eine so bedeutsame Baugeschichte wie wohl kein zweites Baudenkmal in deutschen Landen. Da jedoch alle Trierer Urkunden im Jahre 882 nach Christus bei der Zerstörung der Stadt durch die Normannen zugrunde gingen, gibt nur die Überlieferung, die nach diesem Zeitpunkte nach glaubwürdigen Angaben Überlebender aufgezeichnet wurde, Kunde von den Schicksalen unseres Bauwerkes in den ersten sechs Jahrhunderten seines Bestehens. Die ersten Bauabschnitte, nämlich die der ersten Errichtung und die der Wiederaufbauten nach den gewaltsamen Zerstörungen durch die Franken im fünften Jahrhundert, durch die Hunnen im sechsten und durch die Normannen im neunten Jahrhundert, sind mit den Namen der Bischöfe Agricius, Nicetius und Poppo verbunden. Der erste Ursprung des Domes bildet jedoch noch bis heute den Gegenstand widersprechender Annahmen. Die Überlieferung bezeichnet den römischen Kern des Bauwerkes als die große Prunkhalle im Palast der Kaiserin Helena, der Mutter Konstantins des Großen und derjenigen Heiligen, der in Trier besondere Verehrung zuteil wird. Nach anderer Ansicht ist der Dom ursprünglich schon als gottesdienstliches Gebäude, als Taufkirche mit einem zehneckigen Taufbecken im Mittelpunkte der Zentralanlage errichtet und wäre damit wohl als der älteste christliche Kirchenbau auf deutschem Boden zu bezeichnen. Tatsache ist, daß 2 m unter dem Fußboden der ältesten Krypta im Ostchor noch heute römische Mauerreste vorhanden und sichtbar sind, die nach der kunstvollen Bemalung, die sich auf den Wandflächen befindet, einem vornehmen Römerbau aus guter Zeit angehört haben müssen. Den ursprünglichen römischen Bau, etwa 280 n. Chr. errichtet, bildet derjenige Teil des jetzigen Gebäudes, der von der östlichen Abschlußwand des Schiffes bis zum Kanzelpfeiler reicht (Text-Abb. 3). Bischof Agricius soll Anfang des vierten Jahrhunderts, vermutlich nach einer Zerstörung des reicheren, ersten Gebäudes, den Dom in einfacherer Ausstattung wiederhergestellt haben. Nach den wiederholten Zerstörungen durch Franken im fünften und durch Hunnen im sechsten Jahrhundert fand eine nochmalige Wiederherstellung durch Bischof Nicetius statt, die unter fränkischem Einflusse in roheren Formen, jedoch unter Beibehaltung der ursprünglichen Bauart mit flachen Decken erfolgte.

Wesentlich geändert und erweitert, aber unter Erhaltung des vorhandenen Quadratbaues, wurde das Gebäude, nach der Zerstörung der Stadt durch die Normannen im Jahre 882, unter Erzbischof Poppo im Anfang des elften Jahrhunderts. Damals wurden die beiden westlichen Joche hinzugefügt. Unter Poppos Nachfolger Bruno fand diese Erweiterung ihren Abschluß durch die Ausführung der groß-

1) Eine Anzahl von Angaben sind der kleinen Schrift des Pfarrers Hermann Laven in Leiwen a. d. Mosel: „Der Trierer Dom und seine Vergangenheit", Trier 1911, Fried. Val. Lintz, entnommen. Im übrigen sind die Akten der Kgl. Regierung in Trier benutzt und die Jahresberichte der Provinzialkommission für Denkmalpflege in der Rheinprovinz. Für den baugeschichtlichen Teil hat der Baugeschichtliche Führer durch Trier von v. Behr, Trier 1909, Fr. Lintzsche Buchhandlung, als Quelle gedient.



Abb. 1. Ansicht von Süden.[3])

artigen Westfront mit der Westapsis, den beiden mächtigen Westtürmen und den ihnen angefügten kleineren runden Treppentürmen. In den Jahren 1152 bis 1169 verlängerte Erzbischof Hillin den Dom dann auch nach der entgegengesetzten Seite durch Hinzufügung des Ostchores mit den anschließenden Türmen. Beide Chöre besitzen Krypten. Bereits in frühgotischen Formen ließ Erzbischof Johann I. (1190 bis 1212) den ganzen, bis dahin mit flacher Decke versehenen Bau einwölben und im östlichsten Joche des südlichen Seitenschiffes die reizvolle Muttergotteskapelle einbauen. Sein Nachfolger Theodorich II. (1212 bis 1242) fügte auf der Südseite den Kreuzgang an, der so weit nach Osten gerückt werden mußte, daß westlich von ihm der gleichzeitig an Stelle der alten Taufkirche des Domes[2]) ausgeführte Neubau der Liebfrauenkirche Platz finden konnte.

2) Bei Ausgrabungen, die gelegentlich der Anlage einer Heizkammer für die Liebfrauenkirche zwischen dieser und dem Dome im Jahre 1910 vorgenommen wurden, fand man die Reste einer zentralen Bauanlage, die zweifellos römischen Ursprungs war. Im Provinzialmuseum ist ein genaues Modell derselben aufbewahrt.

3) Abbildungen 1, 5, 6 u. 10 nach Aufnahmen der Königlichen Meßbildanstalt.

Nachdem im 15. Jahrhundert unter Johann II. von Baden die Savignykapelle zwischen dem südlichen Ostturm und dem Nordflügel des Kreuzganges eingebaut und unter Richard v. Greiffenklau im 16. Jahrhundert der südliche Westturm um das spätgotische Geschoß erhöht worden war, ließ Karl Kaspar v. d. Leyen (1652 bis 1676) das Innere des Westchores (Nikolauschor) in barocker Bauart mit reicher Stuckdecke und Figurennischen ausstatten und setzte in diesen so hergerichteten Prachtraum sein in Form eines Doppelaltars gestaltetes, jetzt verschwundenes Riesengrabdenkmal hinein. Sein Nachfolger Hugo v. Orsbeck (1676 bis 1711) verlängerte den Dom durch Errichtung der Schatzkammer nochmals nach Osten hin.

Eine sowohl für das Äußere wie für das Innere sehr bedeutungsvolle Änderung vollzog Franz Ludwig von Pfalz-Neuburg dadurch, daß er die oberen Geschosse der Seitenschiffe in den westlichen Schiffsteilen beseitigen und in bedeutend schmalerer Form wieder aufbauen ließ, eine Anordnung, die in der Weise durchgeführt wurde, daß man die neuen Außenwände mit großer Kühnheit einfach mitten auf die unteren Gewölbe der Seitenschiffe stellte (vgl. Text-Abb. 2

Abb. 2. Oberer Grundriß in Höhe der Triforien.
(Nach Zeichnung von A. Bürde, 1887, unter Zugrundelegung von Meßbildaufnahmen nach Maydenbauer.)

Abb. 3. Grundriß zu ebener Erde mit durchschnittenen Krypten.

und Abb. 2 Bl. 11). Dadurch erhielt der Dom seine basilikale Form und seine Kreuzgestalt. Außerdem wurden bei dem Neubau der Dächer die Giebel mit dem Schmucke barocker Kolossalfiguren und Vasen versehen, die im ersten Abschnitt der Wiederherstellung unserer Zeit beseitigt worden sind. Eine letzte Änderung vor dieser Wiederherstellung erfuhr das Bauwerk noch dadurch, daß im Jahre 1834, nachdem während der Revolutionsstürme der Dom arge Verwüstungen erlitten hatte und namentlich der v. d. Leyensche Doppelaltar im Westchor niedergelegt war,

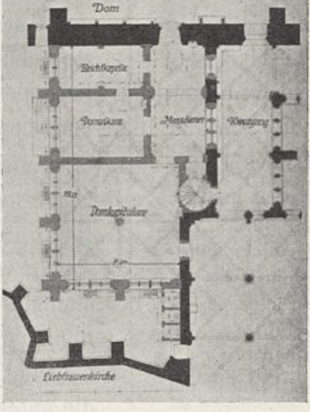


Abb. 4. Neue Sakristei.

dort eine Orgelempore in griechischen Formen eingebaut wurde.

Vor der Wiederherstellung der letzten Jahrzehnte zeigte sich der Dom in der in dem Grundriß (Text-Abb. 2 und 3) dargestellten Form. Sein Zustand im Anfange des vorigen Jahrhunderts war nach den Berichten der Zeitgenossen traurig, ja gefahrdrohend. Die französische Revolutionsarmee und die napoleonischen Truppen hatten das Innere vandalisch verwüstet. Der reiche Schmuck des Bauwerks an kostbaren und kunstvollen Grabmälern und Altären war in



Abb. 5. Orgelbühne im Westchor. Einbau 1832 bis 1837.

rohester Weise fast bis zur völligen Vernichtung beschädigt. Auch die Umfassungsmauern und Gewölbe waren vernachlässigt und infolge schwerer Dachschäden in ihrem Bestande bedroht. Nach einer notdürftigen Instandsetzung des Inneren unter Bischof Mannay, die die Abhaltung eines ersten Gottesdienstes im Jahre 1802 nach langdauernder Entweihung ermöglichte, kam es endlich, nach dem Übergange der Rheinlande in preußischen Besitz, 1824/25 zu einer ersten etwas gründlicheren Instandsetzung, die jedoch auch nur in Dachreparaturen und in einer Ausbesserung der verstümmelten und teilweise ganz zertrümmerten Grabdenkmäler bestand. Wir begegnen hier zum ersten Male dem Namen des um die Baugeschichte Triers verdienten Regierungs- und Baurats v. Quednow, der unter dem ersten preußischen Regierungspräsidenten Freiherrn v. Gärtner, als Bischof Hommer den Bischofsstuhl des heil. Eucharius einnahm, diese ersten bedeutenderen Herstellungen durch den Baukondukteur Bousson vornehmen ließ. Die Instandsetzung der Altäre und Grabdenkmäler war einem Trierer Bildhauer Gunzheimer übertragen, der deswegen von anderen Künstlern und Steinmetzen auf das lebhafteste angefeindet wurde. Unter den instandgesetzten Ausstattungsstücken werden außer dem Hochaltar die beiden Seitenaltäre der heil. Katharina und heil. Agnes, der Allerheiligenaltar und sein Gegenstück, ferner der Dreifaltigkeitsaltar, der Johannesaltar, der Muttergottesaltar, der heil. Kreuzaltar, der Altar über dem Taufstein und die Kanzel genannt. Auffallenderweise sind die beiden schönsten Grabdenkmäler, das von Metzenhausen und und das von Greifenklau, nicht erwähnt, ein Zeichen dafür, daß es wesentlich kirchliche Beweggründe waren, welche diese Instandsetzungen veranlaßten. Auch die „Figuren aus karrarischem Marmor“, die aus den Kellern des Kreuzganges hervorgeholt und wieder aufgestellt wurden, gehörten sicher zu den instandgesetzten Altären.

Der bereits erwähnte Einbau einer in Form einer Säulenhalle gehaltenen Bühne im Westchor zur Aufnahme einer neuen Orgel erfolgte 1832 bis 1837 (Text-Abb. 5). Die Anlage ist vielfach Schinkel zugeschrieben worden. Doch beruht das auf mißverständlicher Auffassung. In das Jahr 1833 fällt ein Besuch Schinkels in Trier, der als Oberbaudirektor die Orgelempore besichtigte und darüber, namentlich über die Benutzung eines mit Säulentabernakel versehenen alten Grabdenkmals als Träger eines Teiles der Bühne, sich gutachtlich äußerte. Aus dem Gutachten vom 8. September 1833 ergibt sich, daß der Einbau ohne seine Mitwirkung hergestellt ist. Die Orgel selbst wurde vom Orgelbauer Breitenfeld in Münster gebaut und der Prospekt nach einer Zeichnung des Bauinspektors Wolff gefertigt, die im Ministerium umgearbeitet wurde und eingehende stilistische Erörterungen verursachte.

Eine gründliche Wiederherstellung des Domes kam erst Ende der vierziger Jahre unter dem tatkräftigen Bischof Arnoldi zustande, als in dem Domkapitular v. Wilmowski

eine Persönlichkeit im Domkapitel gefunden war, die mit ebenso großer Liebe wie eindringendem Kunstverständnis diese wichtige Aufgabe erfaßte. Die genannten Männer sicherten den baulichen Bestand des Gebäudes dadurch, daß sie es außen von dem angehäuften Schutte befreien, tiefe Gräben zur Trockenlegung der Umfassungsmauern und Fundamente herstellen und die vielfach gerissenen Gewölbe und Bögen ausbessern ließen. v. Wilmowski benutzte die Gelegenheit dazu, durch Ausgrabungen im Innern des Domes eine gründliche Untersuchung des Untergrundes vorzunehmen, wodurch er die Grundlage zu einer wissenschaftlichen Feststellung der Baugeschichte des merkwürdigen Gebäudes schuf. Er sammelte alle Funde römischen und fränkischen Ursprungs, zeichnete sie sorgfältig selbst ab und bewahrte sie in dem hierzu gegründeten Dommuseum auf. Auch der alte schadhafte innere Putz an den Wänden und Gewölben wurde beseitigt und dadurch die kritische Untersuchung auf Alter und Entstehungszeit der einzelnen Bauteile ermöglicht. Bei der Aufbringung des neuen Putzes wurden wichtige römische und fränkische Bauteile, wie die Rundbögen und korinthischen Kapitelle im östlichen Teil des Schiffes, sichtbar gelassen.

Die mit namhafter staatlicher Unterstützung erfolgte Herausgabe des Wilmowskischen Werkes über den „Dom zu Trier“ und über „die Grabstätten der Erzbischöfe“ hatte die Aufmerksamkeit der kunstgeschichtlichen Kreise auf den für die Geschichte der Baukunst so hochwichtigen Bau gelenkt, so daß es nach Ablauf der für das Bistum so schmerzlichen Zeit des sog. „Kulturkampfes“ zu Ende der siebziger Jahre nur einer erneuten Anregung bedurfte, um die 30 Jahre vorher tatkräftig begonnene Wiederherstellung des Domes wieder aufzunehmen und in drei Jahrzehnten zu der jetzt erfolgten glücklichen Vollendung zu führen.

Immerhin war die Zwischenzeit nicht ganz unbenutzt vorübergegangen. Auf Veranlassung v. Wilmowskis hatte der damalige Bauinspektor in Trier Giersberg eine bautechnische Untersuchung des Domes vorgenommen und darüber einen sehr ausführlichen, mit Sicherungsvorschlägen versehenen Bericht erstattet, der eine Besichtigung des Domes durch den Referenten für das Kirchenbauwesen im Ministerium der öffentlichen Arbeiten, Geheimen Oberbaurat Salzenberg, zur Folge hatte. Das Instandsetzungsvorhaben wurde nun nicht mehr aus den Augen gelassen. Im Jahre 1878 meldete Dompropst Holzer große Schäden am Gebäude, namentlich an den Fenstern im Ostchor und an den Helmen der beiden Osttürme, und legte Zeichnungen des Baumeisters König vor, auf Grund deren der damalige Trierer Hochbaubeamte Bauinspektor Brauweiler mit der Aufstellung der Instandsetzungspläne begann.

War das Wiederherstellungswerk infolge der Größe des Baudenkmals und des hohen Grades seiner Baufälligkeit ungewöhnlich umfassend und kostspielig, so erwuchs eine ganz besondere Schwierigkeit aus der Aufgabe, die Art der Instandsetzung so zu wählen, daß die baugeschichtlich einzigartige Entwicklung des Baudenkmals und seiner einzelnen Teile dadurch nicht verwischt wurde. Hatte doch jeder Zeitabschnitt im Laufe der Jahrhunderte dem Gebäude sein besonderes stilistisches Gepräge verliehen und ihm außerdem eine mehr oder minder große Zahl von Einzeldenkmälern hinterlassen. Von vornherein war klar, daß bei der Herstellung neuer Zutaten die größte Zurückhaltung geboten war, und daß es sich, soweit irgend möglich, nur um Erhaltung und Sicherung des Bestandes handeln dürfe. In diesem Sinne stellte dann auch die Königliche Akademie des Bauwesens in einem Gutachten vom 7. Juli 1881 das Programm fest. Wenn dieser Grundsatz des reinen Erhaltens im weiteren Verlaufe der Dinge gleichwohl nicht streng durchgeführt worden ist, so hat dies seinen Grund vornehmlich darin, daß man es mit einem „lebenden Denkmal“ zu tun hatte, bei dessen Benutzung den fortschreitenden Bedürfnissen der Zeit entsprochen werden mußte. Auch die schnell wechselnden Zeitanschauungen und Schulmeinungen wie die persönlichen Ansichten der Nächstbeteiligten haben das Geschehene naturgemäß nicht unwesentlich beeinflußt. Immerhin darf gesagt werden, daß den heute geltenden Forderungen der Denkmalpflege, soweit sie nicht an Engherzigkeit und Überempfindsamkeit streifen, entsprochen worden ist.

Bevor das große Wiederherstellungswerk in Angriff genommen wurde, mußte, gewissermaßen als Vorspiel dazu, die schon erwähnte dringend nötige Instandsetzung der östlichen Turmhelme und der Fenster im Ostchor, ebenso die Ausbesserung der erneut schadhaft gewordenen Dächer ihre rasche Erledigung finden. Von Wichtigkeit war die Frage der Gestaltung der Turmhelme. Die Form der „welschen Haubentürme“ beizubehalten, dazu konnte man sich noch nicht entschließen. Der Purismus, welcher am liebsten den Dom im popponischen Sinne wiederhergestellt hätte, war noch nicht ganz überwunden. So fand unter den im Kultusministerium hergestellten verschiedenen Entwürfen die fast „neutrale“ Lösung einer glatten hohen Turmspitze schließlich am meisten Beifall.

Die im Jahre 1884 unter Oberleitung des Regierungs- und Baurats Heldberg durch den vom Domkapitel vorgeschlagenen Kreisbaumeister Wirtz bewirkte Ausführung der Turmhelme verschlang den größten Teil der verfügbaren Mittel. Sie kostete 19 500 Mark; nur 22 560 Mark standen im ganzen zur Verfügung. Das Kapitel entschloß sich daher, besonders im Hinblick auf das weitgehende Wiederherstellungsvorhaben, zur Beantragung einer Geldlotterie.

Dem Antrage zugrunde gelegt wurde ein von einem Gutachten begleiteter Kostenüberschlag von 3 bis 4 Millionen Mark, den der vom Domkapitel herangezogene damalige Privatarchitekt Rincklake (jetzt Benediktinerpater Ludgerus in Maria-Laach) aufstellte.

Zur Beratung dieser Vorlage fand im Juni 1886 unter dem Vorsitz des Ministerialdirektors Dr. Barckhausen eine erste örtliche Zusammenkunft der staatlichen und kirchlichen Kommission statt, an der als weitere Vertreter der Zentralinstanzen der Geheime Oberbaurat Adler, die Geheimen Oberregierungsräte Spieker und Jordan und der Konservator der Kunstdenkmäler Geheimer Oberregierungsrat Persius teilnahmen. Man beschloß in erster Linie eine Meßbildaufnahme des Gebäudebestandes (vgl. Text-Abb. 2 und Bl. 10 u. 11) sowie die Aufstellung eines neuen Wiederherstellungsentwurfes nach wesentlich verändertem Programm. Die Vorschläge Rincklakes erschienen im allgemeinen als viel zu weit gehend. Die von ihm vorgeschlagene Verlegung der großartigen, aus dem Jahre 1711 stammenden, marmornen Treppenanlage zur Schatzkammer aus dem Ostchor in den Westchor



Abb. 6. Ostchor vor der Wiederherstellung.

und die damit verbundene Beseitigung der Schatzkammer selbst wurden einstimmig abgelehnt. Dagegen sollten die Dächer vollständig erneuert werden, und zwar in Eisen, mit Kupferdeckung. Für den Fußboden wurde, wenigstens im Ostchor, Stiftmosaik in Aussicht genommen. Die Beibehaltung der reichen Chorstühle wurde bestimmt und die Wiederanbringung der zugehörigen hohen mit Intarsien und Karyatidenpfeilern geschmückten Rückwände in Erwägung gezogen. Im Schiffe wurde die Beschaffung neuer Bänke und neuer Beichtstühle für notwendig gehalten. Die Sicherung der Mauern und Gewölbe wurde für besonders dringend erklärt. Für weitere Einzelheiten der äußeren und inneren Wiederherstellung wurden sodann in erneuter kommissarischer Verhandlung die maßgebenden Gesichtspunkte festgestellt. Kirchlicherseits wurden dabei die Erhaltung der steilen Barockgiebel auf den Dächern des Querschiffes und der Westfront, die Entfernung der beiden

Barockaltäre aus dem Ostchor, die Anordnung eines Pfarraltars vor der Mitte der Ostchortreppe, die vollständige Freilegung des Westchors durch Beseitigung der griechischen Orgelempore und die Verlegung der Orgel in die Seitenbögen des Westchors als erwünscht bezeichnet.

So konnte Anfang 1889 zur Aufstellung des ausführlichen Entwurfes und Kostenanschlages geschritten werden. Sie wurde dem Regierungsbaumeister Bürde übertragen, der zunächst in Berlin unter Leitung der Ministerialkommissare, später in Trier selbst arbeitete. Nachdem die Vorlage geprüft, von der Akademie des Bauwesens begutachtet und von den kirchlichen Stellen angenommen war, und nachdem die Baumittel in Höhe von 700 000 Mark durch die inzwischen genehmigte Dombaulotterie bereitgestellt waren, konnte 1891 ans Werk gegangen werden.

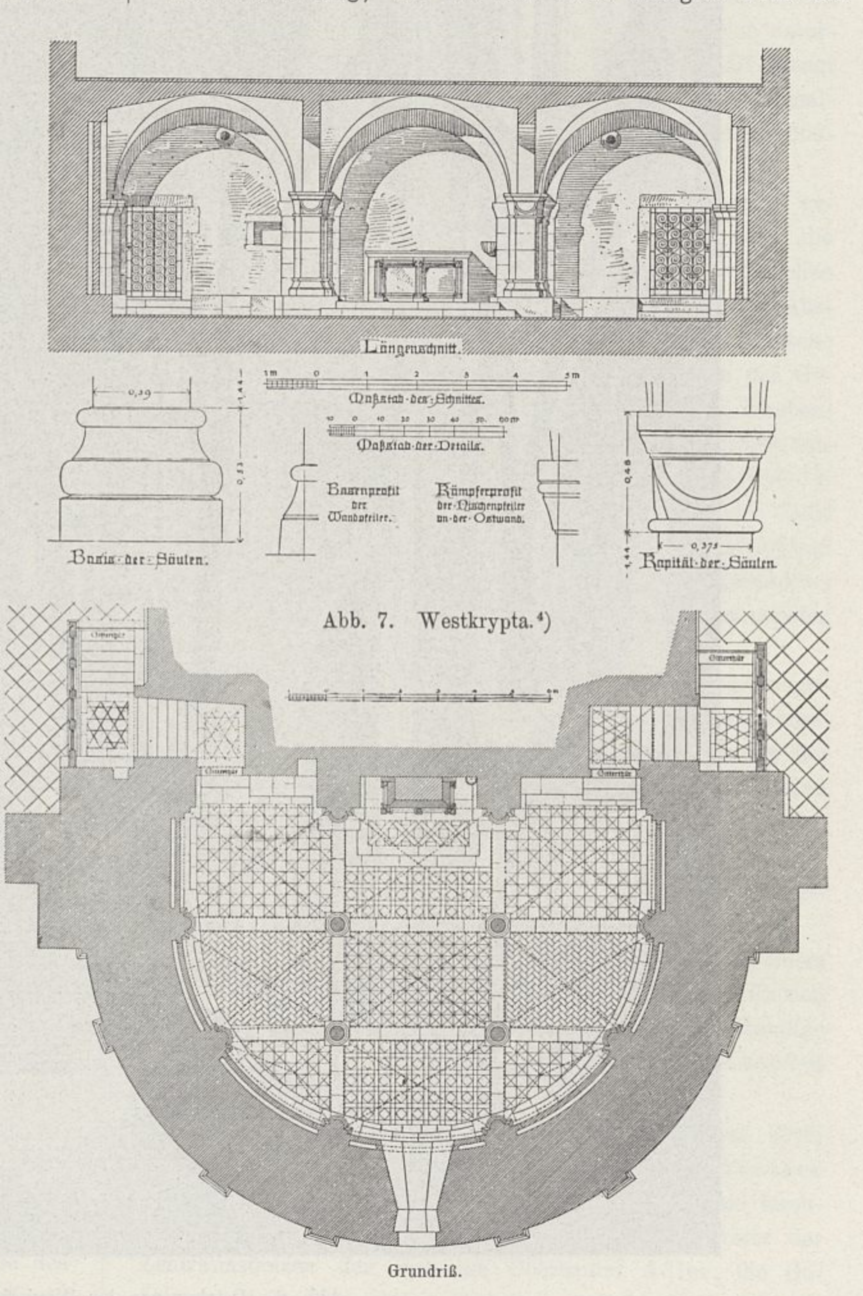


Abb. 7. Westkrypta.[4]

Grundriß.

Die Ausführung wurde unter Oberaufsicht des Regierungs- und Baurats Weyer dem zum Dombaumeister ernannten früheren Kreisbaumeister Wirtz übertragen. Zunächst ging es an die Erneuerung der Dächer, aber nicht unter Erhaltung der steilen Barockgiebel, sondern mit der flachen, noch erkennbaren romanischen Dachneigung (Bl. 6 u. 7). Die beiden Bischofsfiguren und die großen Vasen, welche die Giebel des Kreuzschiffes schmückten, fanden einen Ruheplatz im Kreuzgange. Über der Schatzkammer wurde das eigentümlich geformte barocke Kuppeldach genau in der alten Form erneuert.

Bei der Instandsetzung der Umfassungsmauern wurde der äußere, alte, dünne Putz möglichst geschont, nur die lockeren Stellen wurden erneuert. Die in späterer Zeit, wohl zur Sicherung, hergestellten Ausmauerungen der Fensteröffnungen sowohl in den Türmen am Ostchor wie an der Westfront wurden entfernt und die alten Öffnungen wiederhergestellt. Die aus der Barockzeit herrührenden, schadhaften Balustraden in der mittleren Höhe der Osttürme wurden durch Brüstungen mit quadratischen Füllungen in romanischem Sinne ersetzt, die nach sicheren Anzeichen ursprünglich dort bestanden hatten (Bl. 7). Am Südwestturm wurde jedoch die ganz schadhafte spät gotische Galerie, da sie gleichzeitig mit dem obersten spätgotischen Turmgeschoß hergestellt war, in der alten Form vollständig erneuert. Ebenso mußten daselbst alle Gesimse und Maßwerke, die stark verwittert waren, neu hergestellt werden. Das dem zugehörigen runden Treppenturm in späterer Zeit aufgesetzte rohe und stillose Obergeschoß wurde ganz abgetragen und nicht wieder aufgebaut (Bl. 6), weil es die Architektur der großartigen Westfront empfindlich störte und weil sein Zweck, das Glockengeschoß des Südwestturmes zugänglich zu machen, durch Anlage einer inneren Treppe ohne Schwierigkeiten erreicht werden konnte. Das Uhrzifferblatt des Turmes wurde ein Geschoß tiefer angebracht, und die hinter ihm vorhandenen, aber vermauerten Fenster wurden wieder geöffnet. Im Geschoß darunter konnte das gleiche nicht geschehen, weil die Tragebögen für den Glockenstuhl gegen die Ausmauerungen eingespannt waren; immerhin wurden diese Ausmauerungen so weit zurückgesetzt, daß die Form der romanischen Rundbögen sich von der Mauerflucht abhob. Die Dächer der Westtürme sind nicht in Kupfer, sondern in Schiefer eingedeckt, die Holzkonstruktionen jedoch ebenso wie bei den andern Dächern durch eiserne ersetzt worden. Aus Bl. 6, 7, 10 u. 11 sind der frühere Zustand des Domes und das Bild, welches das Bauwerk nach der Instandsetzung aufweist, ersichtlich.

Diese mit einem Kostenaufwande von rd. 400 000 Mark durchgeführten Herstellungen nahmen die Zeit von sieben Jahren in Anspruch und bildeten den ersten Abschnitt der Wiederherstellung, der mit dem 1898 erfolgten Tode des verdienten ersten Dombaumeisters abschloß. — Inzwischen waren die inneren Arbeiten durch neue Vorlagen und Begutachtungen weiter vorbereitet worden. Auch Seine Majestät der Kaiser hatte bei wiederholten Vorträgen über das Bauvorhaben sein lebhaftes Interesse an dessen Einzelheiten bekundet.

Nach Wirtz' Tode wurde der Architekt Wilhelm Schmitz, der seit 1890 erster Gehilfe des Dombaumeisters Tornow

4) Abbildungen 4 u. 7 bis 9 nach Aufnahmen des Dombaumeisters W. Schmitz.

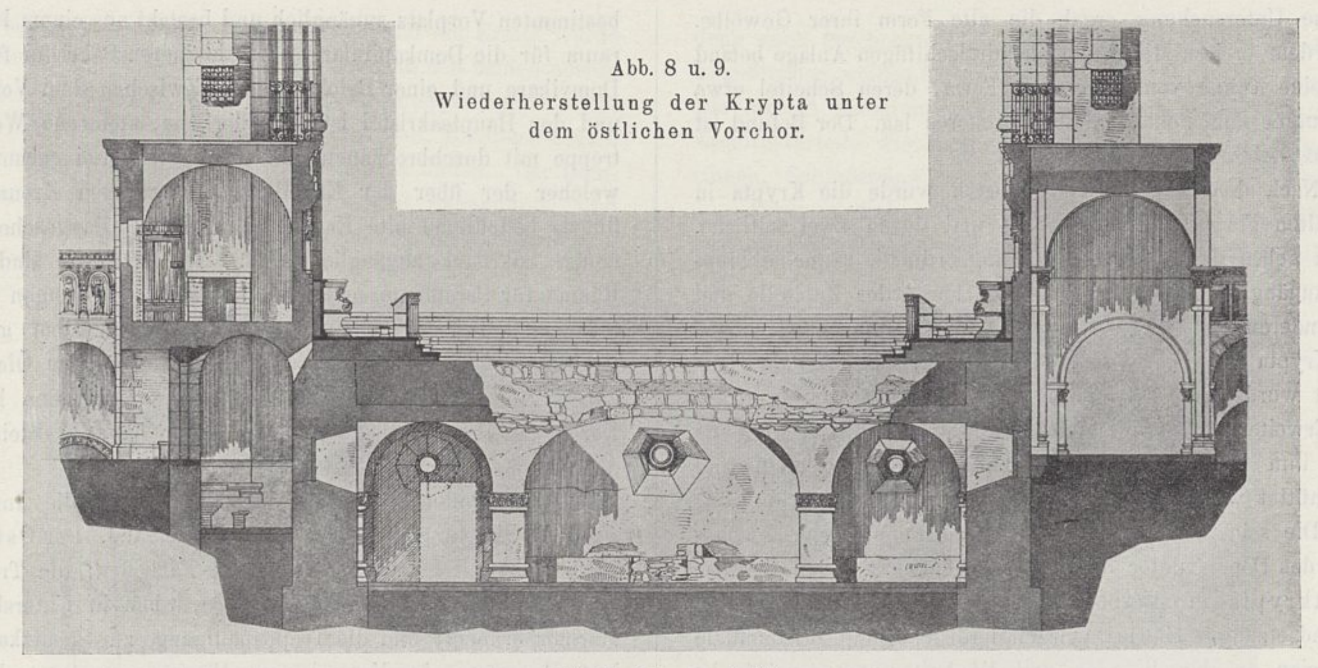


Abb. 8 u. 9.
Wiederherstellung der Krypta unter dem östlichen Vorchor.

Abb. 8. Längenschnitt.

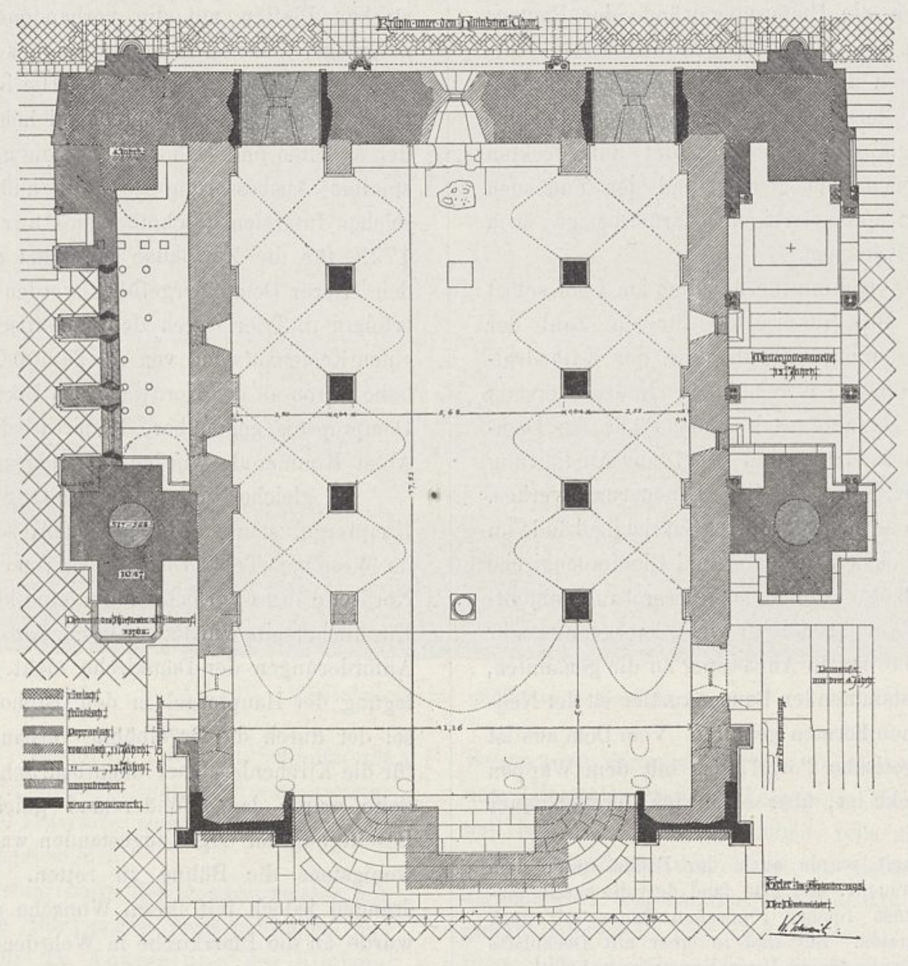


Abb. 9. Grundriß.

bei der Wiederherstellung des Metzer Domes gewesen war, als Dombaumeister nach Trier berufen. Er übernahm die Leitung der weiteren Instandsetzungen, wobei er von dem Sohne seines Vorgängers, dem Architekten Julius Wirtz unterstützt wurde.

Während der Außenarbeiten war im Innern nur das Grabmal des Bischofs Metzenhausen, ein Meisterwerk der Renaissance vom Jahre 1542, durch den Bildhauer Sobry aus Düsseldorf instandgesetzt worden. — Jetzt wurden zunächst die Innenseiten der Umfassungswände sowie die Gewölbe, soweit sie nicht schon unter Bischof Arnoldi gesichert waren, instandgesetzt. Insbesondere wurden an den Triforien und Emporen über den Seitenschiffen die stark verwitterten alten Säulenschäfte aus schwarzem Schiefer durch neue aus dunklem belgischen Granit ersetzt und die schadhaften Schaftringe, Kapitelle, Sockel, Gesimse und Bögen ergänzt oder erneuert.

Eine durchgreifende Änderung erfuhr der Ostchor, indem ihm sein ursprüngliches romanisches Gepräge wiedergegeben wurde. Zwar blieb die zur Schatzkammer führende barocke Marmortreppe in der Apsis bestehen, auch die Chorstühle blieben vollständig erhalten; aber die beiden großen barocken Marmoraltäre der hl. Katharina und hl. Agnes, welche der Kurfürst-Bischof Franz Ludwig von Pfalz-Neuburg (1715 bis 1729) zu beiden Seiten der vorderen Chortreppe errichtet hatte (Text-Abb. 6), wurden beseitigt und in den westlichen Jochen der Seitenschiffe an den Außenwänden neu aufgestellt. An ihre Stelle traten zwei neue Lettneraltäre, die sich in ihrer Formengebung den romanischen Chorschranken anschließen (Bl. 9). Für den Entwurf dieser Altäre und für die Ergänzung der Chorschranken wurden die beim Abbruch der Barockaltäre vorgefundenen romanischen Architekturstücke als Anhaltepunkte benutzt; sodann wurden sie im Dommuseum aufbewahrt.

In Verbindung mit diesen Arbeiten im Ostchore wurde dessen Fußboden ausgehoben und die unter ihm belegene verfallene und ganz verschüttete Krypta freigelegt. Die

genaue Untersuchung ergab die alte Form ihrer Gewölbe. Über dem breiten Mittelschiff der dreischiffigen Anlage befand sich eine Tonne von elliptischer Form, deren Scheitel etwa 1 m unter dem Fußboden des Vorchores lag. Der Befund ist in Text-Abb. 8 u. 9 dargestellt.[5])

Nach den vorgefundenen Resten wurde die Krypta in der alten Form wiederhergestellt und durch zwei seitliche, außen neben den Chorschranken angeordnete, bequeme Treppen zugänglich gemacht. Aus der Form der Kapitelle und aus anderen technischen Merkmalen darf man schließen, daß die Krypta im elften Jahrhundert vom Erzbischof Poppo angelegt wurde und daß sie zu der Zeit, als Erzbischof Hillin die Erweiterung des Ostchores vornahm und darunter die nach ihm benannte Krypta anlegte, bereits verfallen und verschüttet war.

Die seinerzeit im Anschluß an die Popponische Erweiterung des Domes unter der Westapsis angelegte wohlerhaltene Westkrypta (Text-Abb. 7) bedurfte nur einer einfachen Instandsetzung. Hierbei wurden figürliche und ornamentale Malereien an den Wänden und Pfeilern unter der Tünche aufgedeckt. Um sie gegen weitere Schädigungen durch Feuchtigkeit zu schützen und überhaupt die Krypta benutzbar zu machen, wurden die Umfassungswände des Raumes mit Luftschichten isoliert, und an Fenstern und Türen wurden Lüftungsvorrichtungen angebracht. Nach gehöriger Austrocknung des früher kellerartigen Raumes wurden Gewölbe und Wände unter sorgfältiger Schonung der aufgedeckten Malereien in hellen Tönen neu gemalt und der Fußboden mit einem gemusterten, mehrfarbigen Marmorbelage nach romanischen Vorbildern versehen.

Eine Unterbrechung erfuhren die Arbeiten am Dom selbst dadurch, daß die alte Sakristei, die für die Zahl der Geistlichen und die kirchlichen Bedürfnisse der Kathedralkirche nicht mehr genügte, durch einen Neubau ersetzt werden mußte. Dieser gelangte nach einem Plane des Dombaumeisters in den Jahren 1900 und 1901 zur Ausführung und bildet einen besonderen Teil des Erneuerungswerkes. Die schwierige Aufgabe, ein neues größeres Sakristeigebäude an der Stelle des alten zwischen Kreuzgang und Liebfrauenkirche derartig einzufügen, daß der Neubau an dieser baugeschichtlich so bedeutsamen Stelle nicht störend wirkt, hat Schmitz sehr geschickt gelöst (Text-Abb. 4). In Anpassung an die genannten, dem 13. Jahrhundert entstammenden Baudenkmäler ist der Neubau in streng frühgotischen Formen gehalten. Vom Dom aus ist er durch das alte spätgotische Portal, das mit dem Wappen des Domstiftes geschmückt ist, über einen für die Meßdiener bestimmten Vorplatz zugänglich und besteht aus einem Hauptraum für die Domkapitulare, einer kleineren Sakristei für die Domvikare und einer Beichtkapelle. Zwischen dem Vorraum und der Hauptsakristei ist eine zierliche, steinerne Wendeltreppe mit durchbrochenen Umfassungswänden eingebaut, auf welcher der über der Kapelle des westlichen Kreuzgangflügels befindliche alte Kapitelsaal und das Obergeschoß der neuen Sakristei zugänglich sind. In letzterem sind drei Räume für Paramente und zum Umkleiden der jungen Geistlichen bei Priesterweihen angeordnet. Unter dem ganzen Gebäude ist ein Keller angelegt, in welchem die Öfen für die Zentralheizung des Domes Aufstellung gefunden haben. Der ganze Bau ist aus dem feinkörnigen Jaumont-Stein aus den Brüchen von Mezières bei Metz errichtet.[6])

Nach Vollendung der Sakristei nahmen die Instandsetzungen im Innern des Domes ihren Fortgang. Der Ostchor erhielt einen reichen Marmormosaik-Fußboden; die Treppen zum Vorchor und zum Hochchor wurden in Untersberger Marmor erneuert und die Treppenaufgänge zur Schatzkammer instandgesetzt. In Untersberger Marmor wurde auch die neue Beflurung des Schiffes ausgeführt, und zwar wurde sie in rechteckigen, aber unregelmäßig großen, nur 2 cm starken Platten auf die vorhandenen Sandsteinbodenplatten aufgelegt, um das Aufnehmen des alten Bodens und eine neue Unterbettung zu sparen. Die im Fußboden befindlichen Grabplatten wurden entsprechend höher gelegt. Den Abschluß der Arbeiten im Ostchor bildete die gründliche und sehr kostspielige Ausbesserung des mit außerordentlich feinen und reichen Intarsien geschmückten Chorgestühls, das im Jahre 1725 für die Karthause in Mainz angefertigt und 1780 in den Trierer Dom übergeführt worden war. Die Ausbesserung erfolgte in Trier durch den Kunsttischler Kern und erforderte einen Kostenaufwand von rd. 21600 Mark. Auch der bischöfliche Thron an der Nordwand des Hochchores und der Sitz des Dompropstes gegenüber, Empirearbeiten aus der ehemaligen Abtei Himmerod, wurden instandgesetzt.

Zu gleicher Zeit wurde die Orgelfrage aufgerollt. Die Hauptorgel stand, wie wir sahen, seit 1837 auf der Bühne im Westchor (Text-Abb. 5), während sich im Ostchor, an der Nordseite des Chorjoches, nur eine kleine Barockorgel befand. Kirchlicherseits wurde behauptet, daß diese Orgelanordnung den Anforderungen der Domkirche nicht genüge und daß die Verlegung der Hauptorgel in den Ostchor unabweisbar sei. Auch sei der durch die Orgelbühne verbaute Raum des Westchores für die Kirchenbesucher unentbehrlich. Von konservatorischer Seite wurde lange Widerstand geleistet und, nachdem die Beseitigung der Orgel zugestanden war, der Versuch gemacht, wenigstens die Bühne zu retten. Die kirchlichen Stellen drangen jedoch mit ihrem Wunsche durch. Die kleine Orgel wurde an die Pfarrkirche in Wehrden verkauft, die Westchor-

5) Bei der Gelegenheit wurde auch der Boden unter dem Fußboden der Krypta untersucht, und man fand dort die bereits eingangs erwähnten Reste eines reichen römischen Baues mit noch wohlerhaltenen Wandmalereien. Sie sind in einer mit Deckplatte versehenen schachtartigen Grube für die Besichtigung frei gehalten. In einem nördlichen Nebenraum der Krypta fand man außerdem Reste einer römischen Heizanlage und auf der südlichen Seite der Krypta Stufen aus Basaltlava, die als Bestandteile der Tribuna des Römerbaues angesehen werden müssen, der früher an der Stelle des Domes stand. Die Ausgrabungen und Untersuchungen wurden von Schmitz in Verbindung mit dem Provinzial-Konservator der Rheinprovinz Professor Dr. Clemen durchgeführt; alle Fundstücke wurden im Dommuseum aufbewahrt. — Näheres über die Bedeutung dieser Untersuchungen für die Geschichte des Domes findet sich in dem Jahresberichte der Provinzialkommission für Denkmalpflege in den Rheinlanden vom Jahre 1899, S. 43 bis 48.

6) Bei den Gründungsarbeiten wurde der Untergrund unter Beteiligung des damaligen Direktors des Provinzialmuseums Prof. Dr. Hettner untersucht, wobei nicht unbedeutende Reste römischer Bauten gefunden wurden. Wertvollere Teile des bemalten Wandstuckes wurden in großen Tafeln von den Wänden gelöst und im Dommuseum aufgehoben. (Vgl. den Bericht Hettners im Jahresbericht der Provinzialkommission, 1900, S. 97.) Als wichtigstes Ergebnis dieser Untersuchungen kann die Feststellung gelten, daß die römischen Teile des Domes schon in römischer Zeit ein selbständiges Bauwerk bildeten und nicht als Reste eines älteren Palastbaues (der Kaiserin Helena?) anzusehen sind.

orgel mitsamt der Bühne abgebrochen, und als Ersatz wurde eine neue Orgel in zwei getrennten Teilen in den beiden oberen seitlichen Wandbögen des Ostvorchores untergebracht. Nicht leicht für den Architekten war die Aufgabe, für diese beiden großen Orgelgehäuse die passende Form zu finden. Der Dombaumeister hat an den romanischen Stil angeknüpft; und wenn seine Lösung auch nicht ungeteilten Beifall gefunden



Abb. 10. Marienkapelle im südlichen Seitenchor.

hat, so ist doch nicht zu bestreiten, daß sich Schmitz mit dem überaus schwierigen Probleme in sehr anerkennenswerter Weise abgefunden hat. Die Entwürfe wurden deshalb in der Hauptsache unverändert angenommen.

Nicht den gleichen Erfolg hatte der Dombaumeister mit seinen im Prinzip an die Bürdeschen Ausarbeitungen anknüpfenden Vorschlägen für die Ausmalung des Kircheninneren, die er in großen, mit außerordentlicher Liebe und Sorgfalt durchgearbeiteten Entwürfen zur Vorlage brachte. Sie liefen auf eine einheitliche reiche Bemalung der Decken und Wände ebenfalls im romanischen Sinne hinaus. Das ging, darüber waren die staatlichen und kirchlichen Stellen einig, bei diesem Bauwerke nicht an. Der Trierer Dom, dieses in anderthalb Jahrtausenden unter der Herrschaft der verschiedensten Stilepochen gewordene Baudenkmal, mußte neutraler und zurückhaltender behandelt werden. Das ist denn auch geschehen. Die Wände und Gewölbe sind einfach in gebrochen weißen Tönen gestrichen und teilweise gequadert. Die farbige Bemalung und Vergoldung beschränkt sich auf Architekturteile wie Kapitelle, Rippen, Säulchen mit Schaftringen, Schlußsteine, Friese u. dgl. m.

Diese einfache Behandlung der Decken und Wände gestattete nicht nur, sondern forderte, um die Lichtfülle des Raumes zu dämpfen, farbige Fensterverglasung. Sie wurde dem Glasmaler Prof. F. Geiges in Freiburg i. B. übertragen und besteht in teils figürlichen, teils ornamentalen Malereien freier Stilhaltung und nicht zu tiefer Farbengebung. Die dargestellten Gegenstände, für die das Domkapitel das Programm aufgestellt hat, sind folgende. In der Südwand des Querschiffes die Kreuzigung des Herrn zwischen der heiligen Helena links und dem Bischof Agricius rechts; gegenüber, an der Nordwand, die Auferstehung des Herrn zwischen dem Bischof Nicetius links und dem Bischof Maximinus rechts. Im nördlichen Seitenchor die heilige Familie, im südlichen die Immaculata; in der Ostwand des Kreuzschiffes St. Andreas und St. Matthias.

Für die drei Fenster des Westchores sind Kartuschen barocker Stilhaltung mit Bischofswappen geplant, die in die einfache Blankverglasung eingefügt werden sollen. Die übrigen

untergeordneten Fenster sind nur mit Ornamentverglasung ausgestattet, die nach Entwürfen von Geiges durch die Trierer Glasmalerfirmen Binsfeld u. Ko. und W. H. Jansen ausgeführt sind. — Zwischen Ostchor und Mittelschiff befindet sich ein reiches Schmiedeeisengitter, dem die mittlere Bekrönung fehlte. Man hatte sie vor Zeiten verkauft (!). Zum Glück wurde diese Bekrönung bei einem Althändler in Metz entdeckt. Zurückerworben schmückt sie das Gitter wieder und gibt ihm den reichbewegten Abschluß, dessen es bedarf, um mit der übrigen herrlichen nachmittelalterlichen Ausstattung des hohen Chores zusammenzugehen (vgl. Text-Abb. 6 u. Bl. 9).

Das Innere der hinter dem Ostchor befindlichen Schatzkammer wurde ebenfalls instandgesetzt und auch die reiche Stuckdecke der Kuppel, soweit die vorhandenen Mittel reichten, ausgebessert und neu bemalt. Eine Öffnung, welche in der Wand der Schatzkammer nach dem Chore des Domes sich befand, wurde zur größeren Sicherung des kostbaren Domschatzes vollständig zugemauert.

Besondere Erwähnung verdient als selbständiger Teil des Dominneren die frühgotische Marienkapelle im südlichen Seitenchor (Text-Abb. 10). Sie ist in der Nordwand des südlichen Seitenchores eingebaut und durch drei Rundbogenstellungen auf zierlichen gotischen Bündelpfeilern aus schwarzem Marmor vom Seitenchor getrennt. In der Rokokozeit wurden die drei mit Rundbogen abgeschlossenen nördlichen Wandfelder des kleinen offenen Kapellenraumes mit sehr reizvollen, landschaftsbildartig behandelten Flachreliefs geschmückt, welche die Verkündigung, die Begegnung Marias mit Elisabeth und die Anbetung der Hirten darstellen. Auch die oberen Bogenfelder und die Gewölbekappen sind mit Rokokozierwerk geschmückt. Es gelang, hier noch Spuren der ursprünglichen, in zarten Farben gehaltenen Bemalung aufzudecken, und diese ist in schonender Weise vom Maler Bardenhewer wiederhergestellt worden. Außerdem wurde der Wandsockel ringsum mit farbigen Marmorplatten bekleidet, der Fußboden mit Eichenriemchen belegt, der Rokokoaltar instandgesetzt und mit einem alten spätgotischen, von Bischof Korum gestifteten Marienbild ausgestattet. Die Altarmensa erhielt ein vorhandenes barockes Antependium.

Mit besonderer Sorgfalt galt es, die zahlreichen Altäre und Grabmäler instandzusetzen. Sie waren zwar, wie wir gesehen haben, in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts, um die Kirche wieder zu gottesdienstlichen Zwecken brauchbar zu machen, notdürftig ausgebessert worden; doch hatten sich an den mit außerordentlich zierlichem und ungemein reichem Bildwerk geschmückten Denkmälern inzwischen so viele neue Schäden gezeigt, daß eine gründlichere Instandsetzung notwendig war. Im wesentlichen handelt es sich um die aus der frühen und späten Renaissancezeit herrührenden beiden großen Altäre in den östlichen Seitenchören, dem Johannesaltar südlich und dem Dreifaltigkeits- oder v. Eltz-Altar nördlich; ferner um den von dem alten Trierer Meister Ruprecht Hoffmann als sein letztes Werk errichteten Allerheiligenaltar am südlichen Kreuzschiffpfeiler und um den ehemaligen Heilig-Kreuz-Altar oder das Grabmal des Bischofs Richard v. Greifenklau am Kanzelpfeiler. Diese Altäre sind aus feinkörnigem Kalksandstein hergestellt und mit einer Unmenge von Figurenwerk kleinen und kleinsten Maßstabes in Einzelgestalten, Gruppen und Reliefs geschmückt, während die übrigen aus der Barockzeit herrührenden Altäre des Domes in großem Maßstabe aus schwarzem Marmor mit fast lebensgroßen Figuren aus weißem Marmor gefertigt sind und sich deshalb als widerstandsfähiger erwiesen haben. Bildhauer Sobry hat diese Arbeiten mit gutem Erfolge ausgeführt, so daß die sehr bedeutenden Kunstwerke wieder in ihrer ursprünglichen Schönheit genossen werden können.

Im Anschluß hieran ist zu erwähnen, daß auch die Reste früherer Grabmäler, welche in Form von spätromanischen Bogenstellungen an der Südwand des Domes sich befanden oder befunden hatten, dort wieder angebracht und ausgebessert oder ergänzt wurden, nachdem man aus den im Dommuseum aufbewahrten Bruchstücken ihre ursprüngliche Bedeutung als Grabdenkmäler erkannt hatte.

Als letzte Arbeit verblieb nun noch die Neugestaltung des Westchores. Dieser befand sich nach Hinwegnahme der Orgel und Abbruch der Orgelbühne in seinen unteren Teilen in einem sehr ruinenhaften Zustande und forderte dringend eine würdige Instandsetzung. Daß diese im Anschluß an die unter Kaspar v. d. Leyen hergestellte reiche Stuckdekoration der Decke und an die Reste der Marmorausstattung der unteren Teile des Chores nur in barocker Formgebung durchgeführt werden konnte, erschien zunächst unzweifelhaft. In Frage gestellt wurde dieser Plan jedoch dadurch, daß sich nach Inangriffnahme der vorbereitenden Arbeiten unter dem Fußboden und in den vielfach zusammengestückelten seitlichen Schranken des Chorjoches Reste des romanischen Chorausbaues vorfanden. Der Gedanke, den Westchor unter Benutzung dieser zum Teil wohlerhaltenen Bruchstücke in seiner ursprünglichen romanischen Gestalt wiederherzustellen, wurde namentlich von dem Dombaumeister mit Lebhaftigkeit aufgegriffen. Sein Wiederherstellungsplan ist im Jahresbericht der rheinischen Provinzialkommission, 1910, veröffentlicht und zeigt den vorderen Abschluß der halbrunden Apsis in Form einer Zwergbogenstellung mit kleinen Apostelfiguren, zu beiden Seiten begrenzt von Treppenaufgängen, die, mit romanischen Brüstungsschranken eingefaßt, zur Apsis hinaufführen, während neben ihnen zwei andere Treppen zur Krypta hinableiten. Erfuhr dieser Plan schon dadurch eine Störung, daß gleichzeitig die Reste einer 100 Jahre später erfolgten Änderung der ursprünglichen Choranlage gefunden wurden,[7]) so erwies er sich auch aus der schon oben angedeuteten konservatorischen Erwägung undurchführbar. Er hätte notwendigerweise die Beseitigung des vorhandenen barocken Ausbaues zur Folge gehabt. Dieser ist aber so wertvoll und hat sich in dem Baudenkmale ein so starkes geschichtliches Recht erworben, daß dem puristischen Plane keine Folge gegeben werden konnte. Selbst der Umstand, daß zu gleicher Zeit im unteren Teile der Apsiswand sieben große Rundbogennischen aufgedeckt worden waren, deren Ausmauerung zum großen Teile aus den Bruchstücken jener romanischen Schrankenarchitektur und aus den Stücken der zertrümmerten Bischofsgrabmäler bestand, konnte den auf das Zurückrestaurieren gerichteten Plan nicht stützen, und zwar um so weniger, als sich in den Nischen Malereien des 16. Jahrhunderts vorfanden.

7) Sieh den genannten Jahresbericht Seite 67.

Der Westchor wurde also im Anschluß an die barocken Reste ausgebaut. Außer der Decken- und oberen Wanddekoration, der Treppenanlage und den diese seitlich einfassenden Marmorschrankenteilen blieb ihm auch der von einem säulengetragenen Baldachin überdeckte Marmorsarkophag erhalten, von dem immer noch nicht feststeht, wessen Grab er deckt.[8]) Nur die aus Stuck hergestellten Kolossalfiguren der sieben Apostel in den Muschelnischen unter den Fenstern der Apsis, die wegen ihrer dekorativ übertriebenen, aufgeregten Bewegung bei den kirchlichen Stellen Anstoß erregten und in der Tat nur wenig künstlerischen Wert besitzen, wurden aus ihren Nischen entfernt und im Untergeschoß der Schatzkammer aufbewahrt. Die Nischen sollen später einmal bessere Marmorfiguren erhalten.

Den genannten erhaltenen Teilen der Barockdekoration galt es nun, die neuen Ausbauteile anzupassen. Es geschah dies in der aus Blatt 8 hervorgehenden Weise. Die Treppenanlage ist durch Wiederaufstellung der noch vorhandenen Seitenwangen und durch Hinzufügung einer diese Wangen oben verbindenden gleichartigen Brüstung vervollständigt worden. In der Mitte der letzteren hat eine von dem v. d. Leyenschen Altare stammende Kreuzigungsgruppe aus weißem Marmor Platz gefunden. Die Seitenpostamente sind mit neuen Marmorvasen geschmückt. Die Treppenaufgänge sollen noch mit reichen Bronzetüren von Brüstungshöhe abgeschlossen werden. Auch für die seitlichen geschlossenen Schranken des Chorjoches sind Reste der großen v. d. Leyenschen Altaranlage, so eine Anzahl roter Marmorsäulen mit zugehörigen Kapitellen, Basen und einigen Gebälkstücken, die sich in den Aufbewahrungsräumen des Domes vorfanden, anhaltgebend verwendet worden. Die Schranken bestehen aus marmorgetäfelten Sockelzonen, auf denen sich architektonisch reich gegliederte Aufbauten erheben. Die höher geführten Mittelbauten dieser Obergeschosse erhielten einen bedeutsamen Schmuck in Gruppen von je drei weißen Marmorfiguren, in denen auf der Südseite der heil. Martinus zwischen St. Ambrosius und St. Athanasius, auf der Nordseite der heil. Nikolaus zwischen St. Paulinus und St. Hieronymus dargestellt sind. Unter den Gestalten der beiden großen Heiligen der katholischen Kirche Martin und Nikolaus sind Szenen aus deren Leben in Kartuschenschildern angebracht. Weiter unten, im Sockel, vom Domkapitel verfaßte Inschriften mit folgendem Wortlaut:

Auf der Südseite:

Pio X Pont. Max.
Guilelmo II Imperatore
Michaele Felice Korum Episcopo
Instauratio Hujus Templi
Decem Et Octo Abhinc Annis Incoepta
Ad Exitum Perducta Feliciter Fuit
Refectione Hujus Absidis
Anno MCMX.

Auf der Nordseite:

Capitulum
Ecclesiae Cathedralis
Contribuentibus Fidelium
Fovente Gubernio Regio
Restaurationis Opus
Perficiendum
Curavit.

Die sechs Heiligenfiguren nebst den zugehörigen Reliefs sind von den Bildhauern Degen in Köln und Petri in Berlin gefertigt worden.

Die reiche Stuckdekoration der Halbkuppel, welche laut Inschrift Jovanni Domenico Rossi 1668 gefertigt hat,[9]) wurde sorgfältig ausgebessert und in der ursprünglichen Färbung wiederhergestellt. Ebenso die oberen Teile der Umfassungswand der Apsis, wo in den Fensterleibungen unter der weißen Kalktünche leichtfarbige Musterungen aufgedeckt wurden. Der kahle Fuß der Apsis wurde mit den von dem reichen einstigen Gestühl des Ostchores noch vorhandenen Rückwänden bekleidet, die sich mit ihrem aus Intarsien und Halbkaryatiden bestehenden Schmucke für diesen Zweck sehr gut eigneten. In der Hauptachse fand als Mittelstück zwischen dem Chorgestühl ein alter Barockaltar Aufstellung, dessen Bild einer Stiftung durch das Domkapitel vorbehalten ist.

Mit der Vollendung des Westchores war, wie die obige Inschrift besagt, die eigentliche Wiederherstellung abgeschlossen. Doch war in letzter Zeit immer lebhafter auch der Wunsch nach einer Beheizung des Gotteshauses und nach Ersatz der vorhandenen Gasbeleuchtung durch elektrisches Licht hervorgetreten. Die Heizung ließ sich ohne Schwierigkeiten in den Kellerräumen der neuen Sakristei als Heißluftheizung nach der Wellenschen Bauweise in Düsseldorf einbauen. Für die Erhellung des Domes mit elektrischem Licht wählte man eine Art mittelbarer Beleuchtung, indem starke Lichtquellen auf den Triforiengalerien so angeordnet wurden, daß sie, vom Schiff aus nicht sichtbar, ihr Licht mittels angebrachter Spiegel so auf die Gewölbe werfen, daß es rückstrahlend den ganzen Raum mit gleichmäßiger Helligkeit erfüllt. Und zwar bestehen diese Lichtquellen im Mittelschiff und Ostchor zusammen in 40 Lampen von je 500 Kerzen Stärke. Außerdem wurden in den Seitenschiffen noch acht Lampen von je 500 Kerzen und im Querschiff acht Lampen von je 1000 Kerzen angebracht, während im Westchor auf der Deckplatte des Säulenbaldachins über dem Marmorsarkophage vier Lampen von je 1000 Kerzen Platz fanden. Die Gesamtstärke aller dieser Lampen beträgt also 36000 Kerzen. Schließlich wurden, um das Licht auch für schärferes Sehen geeignet zu machen, an den Pfeilern unmittelbar wirkende Beleuchtungskörper angebracht. Die Gesamtwirkung der Beleuchtung ist sehr glänzend und geht an die Grenze des in einem altehrwürdigen, stimmungsvollen Kirchenraume Zulässigen; Schönheit kann ihr aber nicht abgesprochen werden.

Auch den Nebenräumen des Domes ist, und zwar schon während der Arbeiten am Kirchengebäude selbst, die nötige Beachtung geschenkt worden; namentlich der Kreuzgang wurde in die große Wiederherstellungsarbeit einbezogen. Hier handelte es sich jedoch um eine rein konservatorische Instandsetzung, ohne daß Neuherstellungen in Frage gekommen wären. Im Zusammenhange damit wurden auch die Nebenräume am Kreuzgange, die Savignykapelle im Nordflügel und die Kapitelskapelle unter dem Kapitelsaal im Westflügel ausgebessert. Ebenso die unteren Räume des Dommuseums, das im Laufe der Instandsetzungsarbeit am Dome eine wesentliche Erweiterung und Bereicherung erfuhr. Hierbei fand auch eine systematische Neuordnung der Samm-

8) Vgl. die Abhandlung des Domvikars Dr. Wiegand im Pastor bonus 1905/06.

9) Die Inschriften lauten: „Jo Jovanni Domenico Rossi opera fecit VR.“ und: „Janno de Signore adi 12 Nov. 1668.“

lungen statt, indem die Stücke der baulichen Entwicklung des Domes entsprechend nach Stilarten gesondert in drei Sälen geordnet wurden, so daß der große, aus romanischer Zeit herrührende Saal die römischen und romanischen Stücke erhielt, während in einem gotischen Saale die Reste aus gotischer und späterer Zeit untergebracht wurden. Der dritte Raum dient zur Aufbewahrung von Abgüssen. Die Erweiterung war um so notwendiger, als gleichzeitig das bisherige Dommuseum zu einem allgemeinen Diözesanmuseum umgewandelt wurde, um dem Verkauf und der Zerstreuung kirchlicher Gegenstände von Denkmalwert im ganzen Bistum zu steuern.

Die Kosten der gesamten Wiederherstellung haben 1410000 Mark betragen. Davon entfallen 555000 Mark auf die Instandsetzungen am Äußeren einschl. der Dächer, 702000 Mark auf diejenigen im Innern und 153000 Mark auf den Neubau der Sakristei. 1075000 Mark sind durch zwei Lotterien aufgebracht, der Rest von 335000 Mark wurde teils aus einem Allerhöchsten Gnadengeschenk von 20000 Mark bestritten, teils aus den während der Dauer der Arbeiten sich ergebenden Zinsen der Lotterieerträge sowie aus den nicht abgehobenen Gewinnen der Lotterien und aus Mitteln des Domkapitels, soweit es sich um Arbeiten handelte, die nicht unbedingt zur Instandsetzung zu rechnen waren. Besondere Stiftungen, so z. B. reichere Fenster, das Altarbild der Marienkapelle und rein kirchliche Beschaffungen, wie der Sakramentenschrein für den Dreifaltigkeitsaltar u. a. m., sind hierbei nicht berücksichtigt.

Von ausführenden Meistern, soweit sie nicht schon oben genannt wurden, sind noch zu erwähnen für die Ausmalung der Maler Thomas, für die neuen Mensen der Altäre die Firma Schüller u. Ko., für die Kunsttischlerarbeiten der Tischler Kern und für das Kunstschmiedewerk der Kunstschlosser Schäfer, sämtlich in Trier.

Die Namen der in früheren Zeiten am Wiederherstellungswerke des Domes beteiligten Baumeister sind im Verlaufe unserer Darstellung, namentlich in dem die Einleitung bildenden geschichtlichen Teile, bereits genannt. Die Hauptträger des Wiederherstellungswerkes sind selbstverständlich die Dombaumeister; für den in diesen Mitteilungen im besonderen behandelten Bauabschnitt also die Architekten Wirtz sen., Wilhelm Schmitz und Wirtz jun. Weniger mitschaffend als beratend und begutachtend haben als oberste Vertreter der Staatsbauverwaltung nacheinander die Geheimen Oberbauräte Adler und Hoßfeld mitgewirkt. Daneben die Departementsbauräte Heimsoeth, v. Pelser-Berensberg und der Unterzeichnete sowie die zuständigen Ortsbaubeamten Brauweiler und Fülles. Zur Wahrung der Denkmalspflege-Interessen schließlich die Konservatoren der Kunstdenkmäler Geheimen Oberregierungsräte Persius und Lutsch und der Provinzialkonservator Prof. Dr. Clemen. Die Zahl der Namen würde sich außerordentlich vermehren, sollten hier alle diejenigen genannt werden, die sich durch Feder- und Verwaltungsarbeit um das glücklich zu Ende geführte Werk verdient gemacht haben. Da es sich jedoch an dieser Stelle lediglich um eine fachwissenschaftliche Darstellung handelt, sei sie auf die Genannten beschränkt. Gibt doch schon ihre Zahl ein bezeichnendes Bild der Vielköpfigkeit und Verwickeltheit, unter der heute wie früher die Durchführung eines so bedeutsamen Werkes sich vollzieht, wie es die Wiederherstellung des einzigartigen Trierer Domes darstellt.

v. Behr.

Walkenried.

Baugeschichtliche Untersuchungen und Studien.

Von Hans Pfeifer.

(Mit Abbildungen auf Blatt 12 im Atlas.)

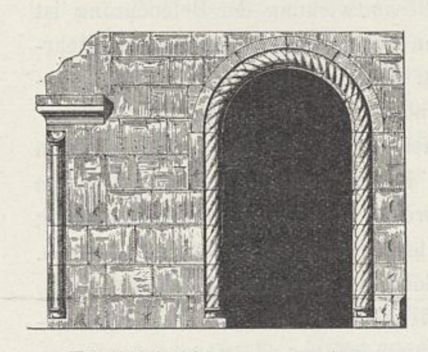


Abb. 1. Nördliches Klostertor.

Im ersten Hefte der „Studien zur thüringisch-sächsischen Kunstgeschichte“ hat Hermann Giesau eine Abhandlung unter dem Titel: „Eine deutsche Bauhütte aus dem Anfange des 13. Jahrhunderts“[1]) veröffentlicht, die von eingehenden Studien der Walkenrieder Klosterkirche und verwandter Kirchenbauten zeugt. Während Giesau sich auf die gotischen Baureste der Kirche beschränkt, hat Dr. Karl Steinacker „Betrachtungen über die angebliche Verlegung Kloster Walkenrieds, sowie über die Entstehung und den Verfall seiner Kirche“ im Februarheft 1913 der „Zeitschrift für Architektur“[2]) angestellt, die sich auch mit den vorgotischen Kirchenbauten befassen, wie solche im Jahre 1900 von mir in Resten freigelegt und in dem „Jahresberichte des Architekten- und Ingenieur-Vereins für das Herzogtum Braunschweig 1900/1901“ beschrieben wurden. Endlich hat Dr. Steinacker noch in dem dritten Hefte des „Braunschweigischen Magazins“ vom Jahre 1913 die Giesausche Schrift einer teilweisen kritischen Betrachtung unterzogen.[3])

Da meine Untersuchungen an Ort und Stelle zu wesentlich anderen Ergebnissen über die ehemalige Zisterzienserkirche in Walkenried geführt haben, als sie in den vorstehend genannten Arbeiten niedergelegt sind, da ferner mein Bericht über die Untersuchungen im Jahre 1900 einem nur beschränkten Kreise zugänglich geworden ist, so dürfte es

1) Halle a. d. S. 1912, Gebauer-Schwetschke, Druckerei und Verlag G. m. b. H.

2) Jahrgang VI (1913), Heidelberg, Karl Winters Universitätsbuchhandlung.

3) Julius Zwiesler, Wolfenbüttel.

angezeigt sein, auf die inzwischen auch auf den gotischen Bau ausgedehnten Untersuchungen und die daraus abzuleitenden Schlußfolgerungen an dieser Stelle näher einzugehen.

Die Geschichte des Zisterzienserklosters Walkenried stützt sich im wesentlichen auf das vom historischen Verein für Niedersachsen herausgegebene Urkundenbuch[4]), auf die ungedruckte Chronik J. H. Hofmanns vom Jahre 1661 im Staatsarchiv in Hannover, auf Eckstorms 1617 herausgegebene Walkenrieder Chronik und auf Leukfelds „Antiquitates Walkenredenses“ oder historische Beschreibung der ehemaligen Abtey Walkenried, Zisterzienserordens, die 1706 erschienen ist.

Aus der Geschichte des Klosters sei kurz hervorgehoben, daß etwa um das Jahr 1118 ein Graf Volkmar von Thüringen oder Klettenberg in das Benediktinerkloster Huyseburg bei Halberstadt eingetreten war, um den Rest seines bewegten Lebens in Ruhe und Zurückgezogenheit zu verleben. Mit Zustimmung seiner Gemahlin Adelheid aus dem Geschlechte der Grafen von Lohra und seiner sonstigen Verwandten, darunter auch Herzog Lothar von Sachsen, Graf von Süpplingenburg, der spätere Kaiser, hatte Volkmar seinem Kloster neben anderen Zuwendungen auch das Gut Walkenried zugebracht. Adelheid hatte aber die Absicht, selbst ein Kloster zu ihrer Seele Seligkeit zu stiften und erbat sich Walkenried als Eigentum zurück, um hier die Klostergründung vorzunehmen. Diese sollte von Huyseburg aus erfolgen; etwa um 1120 trat sie mit dem Abte Alfrid, einem baulustigen Herrn, in Verbindung, und dieser erklärte sich anfangs auch bereit, die Klostergründung in Walkenried zu unterstützen. Da er selbst aber noch mit dem Bau der eigenen Kirche[5]) auf dem Huy beschäftigt war und erhebliche Lasten zu tragen hatte und weil der Ort der neuen Klostergründung, eine sumpfige Rietgegend, für die Benediktiner nicht geeignet schien, brach er die Verhandlungen mit der Gräfin Adelheid ab und willigte um 1124 in einen Güteraustausch ein, wodurch Walkenried der Gräfin zur freien Verfügung überlassen wurde.

Im Jahre 1122 soll Adelheid auf einer Reise nach Neuß zum Grabe des Heiligen Quirinius nach dem Zisterzienserkloster Altenkampen bei Köln gekommen und hier zu dem Entschlusse gelangt sein, zu ihrer Klostergründung in Walkenried Zisterziensermönche heranzuziehen. Altenkampen ist aber erst 1122 als Tochter des Stammklosters Morimond, einer der vier ältesten Abzweigungen vom Mutterkloster Citeaux, gegründet. Der Konvent war also noch klein, und so erklärt es sich, daß die Verhandlungen Adelheids mit Altenkampen bis 1127 sich hinzogen und erst 1129 ein Klosterkonvent nach der Zisterzienserregel in Walkenried einzog.

Aus den Geschichtsquellen läßt sich mithin nicht nachweisen, daß Benediktiner einen Kirchenbau in Walkenried ausgeführt haben; die Baureste aber, die im Jahre 1900 auf dem Klostergebiete in Walkenried aufgedeckt und eingehend von mir untersucht sind, berechtigen zu der Annahme, daß die Zisterzienser bei dem Einzuge 1129 in Walkenried bereits einen zwei Bauzeiten angehörenden Kirchenbau vorgefunden haben. Auf die von Kaiser Lothar 1132 in Mühlhausen ausgestellte Bestätigungsurkunde, die nur von einem Benediktinerkloster in Walkenried spricht, soll hierbei kein Wert gelegt werden; denn die Echtheit dieser Urkunde steht in Zweifel, und es ist wohl denkbar, daß die Benediktiner absichtlich in der Fälschung genannt sind, um diesen Orden, dessen Ansehen tief gesunken war, auf Kosten der emporstrebenden Zisterzienser, deren Stiftung in Walkenried zur Zeit der Urkundenfälschung vielleicht bereits in hoher Blüte stand, in ein besseres Licht zu setzen. Die Annahme,[6]) daß die Zisterzienser in Walkenried in der Urkunde mit den Benediktinern verwechselt seien, weil erstere aus dem Benediktinerorden hervorgegangen sind, ist deshalb wenig glaubhaft, weil bereits seit 1119 eine alle Zisterzienserklöster umfassende Organisation, die Charta caritatis, bestand und der Orden sich in einen geradezu revolutionären Gegensatz zu den Benediktinern von vornherein gesetzt hatte. Dieser Gegensatz kommt auch in dem Berichte des Abtes Alfrid von Huyseburg über den Güteraustausch mit der Gräfin Adelheid vom Jahre 1131 zum Ausdruck, wenn von den für die Klostergründung herangezogenen Zisterziensern in verächtlichem Tone als von Leuten mönchischer Lebensweise gesprochen wird.[7]) Zur Zeit des Einzuges der Zisterzienser und der Klostergründung in Walkenried war der Zisterzienserorden nicht nur bei den weltlichen und geistlichen Machthabern, sondern auch wegen seiner Arbeitsamkeit und des sittenreinen Lebens der Mönche im Gegensatz zu den genußsüchtigen und ausschweifenden Benediktinern auch bei dem Volke über die Grenzen Frankreichs hinaus angesehen. Am päpstlichen Stuhle wirkte der eigentliche Stifter des Ordens, der Heilige Bernhard, an hervorragender Stelle, setzte Fürsten und Päpste ein, so daß es nicht denkbar ist, daß eine Verwechslung zwischen Zisterziensern und Benediktinern vorkommen konnte, zumal in Walkenried, zu dem Kaiser Lothar Beziehungen hatte, der selbst aber aus politischen Gründen von der zisterziensischen Reformpartei abhängig war. Lothar hat also die machtvolle Stellung der Zisterzienser zur Zeit der Klostergründung und die tiefe Kluft gekannt, welche die Zisterzienser von den Benediktinern trennte.

Über die Lage des ersten Klosters in Walkenried spricht sich Leukfeld, gestützt auf Eckstorm, mit einer solchen verblüffenden Sicherheit aus, daß alle Schriftsteller, die über Walkenried geschrieben haben, sich zu gleichen Angaben haben verleiten lassen, obgleich das Vorhandensein zahlreicher Baureste, wie z. B. das nördliche Klostertor (Text-Abb. 1) und viele Einzelheiten auf dem jetzigen Klostergebiete, zu der Annahme hätten führen müssen, daß das alte Kloster nur an der jetzigen Stelle gestanden haben kann. Leukfeld sagt: „Und dies war anfänglich nicht diejenige Stelle, wo noch jetzo das Kloster zu sehen, sondern $^1/_4$ Stunde von diesem nach Mitternacht (N), doch in demselbigen Tale über das Wasser gelegen, woselbst noch einige alte Denkmale von dem ersten Kloster gesehen werden können und bis jetzo das ‚alte Walkenried‘ von den Einwohnern selbiger Gegend genennet wird. Und hatte solcher Ort die Stadt Ellerich gegen Morgen (O), gegen Abend (W) aber das Wasser, die Wieda genannt und fernerhin die Sachsa zur nächsten Grenze, da hergegen bei dem anderen und jetzigen Klosterhofe die

4) Hannover, Hahnsche Hofbuchhandlung, 1852.

5) 1121 vom Bischof Reinhardt von Halberstadt geweiht.

6) Karl Steinacker, S. 26.

7) Ebenda, Urkundenbuch S. 1.

Wieda gegen Morgen (O) vorbeifließet. Dabei aber gedachtes Ellerich nach voriger Distance eine halbe Stunde von ihnen liegen bleibet." Die ausführliche Beschreibung der Lage des alten Walkenrieder Klosters trifft nun genau auf ein Ackerstück nördlich von dem heutigen Walkenried (Abb. 2 Bl. 12) zu, das über dem Wasser (d. h. jenseit der Wieda vom jetzigen Kloster aus) gelegen, die Wieda westlich hat und in alten Flurkarten als das „alte Kloster" bezeichnet wird. Eckstorm (1617) hat hier noch Ruinen im Walde und Leukfeld (1706) Mauerreste gesehen; wenn aber damals bereits der Ackerplan als das „alte Walkenried" bezeichnet wurde, so ist die Annahme wohl berechtigt, daß diese Bezeichnung auf eine weit ältere Überlieferung zurückgeht, der etwas Tatsächliches zugrunde liegen muß. Daß Eckstorm und Leukfeld bei ihrer Ortsbeschreibung lediglich das Kloster, nicht aber den älteren Ort Walkenried im Auge gehabt haben, steht außer Zweifel. Die Annahme, daß hier die erste Siedlung der Mönche gewesen, gewinnt noch mehr Berechtigung, als sich unmittelbar neben diesem Ackerstück ein weiterer Plan befindet, der von altersher als „Beim Gerichte" bezeichnet wird.

Die von mir vorgenommene Untersuchung des „das alte Kloster" bezeichneten Ackerplanes hat ergeben, daß die Grundmauern teilweise noch im Erdboden vorhanden sind; die Aufgrabungen förderten eine Menge Brandschutt und Holzkohlenreste zutage, ein Beweis, daß die hier errichtet gewesenen Gebäude ganz oder vorwiegend aus Holz hergestellt waren. Diese Annahme wird noch dadurch unterstützt, daß die Grundmauern als sogenannte Trockenmauern ohne Mörtel, aufgeführt waren, die einen schweren Massivbau nicht hätten tragen können. Wenn hier aber Holzbauten errichtet waren, so dienten diese nur einem vorübergehenden Zwecke. Es ist daher wahrscheinlich, daß wir hier tatsächlich die älteste klösterliche Siedlung der Walkenrieder Mönche vor uns haben, die aufgegeben wurde, sobald massive Klostergebäude an der jetzigen Stelle des Klosters fertiggestellt und geweiht waren.

Daß der eigentliche Klosterbau an anderer Stelle errichtet wurde, kann nicht auffallen und ist von zahlreichen anderen Zisterziensergründungen des 12. Jahrhunderts bezeugt. Es sei hier nur an das mit Walkenried so zahlreiche Übereinstimmungen zeigende, 1127 von Morimond aus gegründete Zisterzienserkloster Ebrach bei Bamberg erinnert, dessen erste Siedlung ebenfalls nicht an der Stelle des im Anfange des 13. Jahrhunderts neugebauten Klosters gelegen hat.[8]) Auch hier sollen die ersten Baulichkeiten des Cönobiums ganz einfache Holzbauten gewesen sein. Irgendwo mußte doch der Konvent, selbst wenn es nur Konversen gewesen wären, was aber nicht denkbar ist, während des Klosterbaues untergebracht werden. Eckstorm und Leukfeld haben daher ganz recht, wenn sie von einer Verlegung des Klosters sprechen; nur versetzen sie diese irrtümlich in den Anfang des 13. Jahrhunderts.

Steinacker bestreitet die Verlegung überhaupt, indem er annimmt, der Ausdruck Leukfelds „das alte Walkenried" beziehe sich nicht auf das Kloster, sondern auf den Ort „Alt-Walkenried", der bereits vor der Klostergründung vorhanden gewesen ist; auch bezweifelt er, daß die beschriebene Stelle heute angeblich „Altes Kloster" bezeichnet wird, weil ihm die Stelle nur als „das Gericht", wie ich annehme von Einheimischen, gewiesen sei. Hätte Steinacker aber die älteren Flurkarten Walkenrieds eingesehen, so würde er voraussichtlich nicht zu dem Ergebnis, daß hier lediglich die alte Richtstätte gelegen habe, gekommen sein; er wäre dann auch vor der etwas kühnen Vermutung bewahrt geblieben, die Holzkohlenreste mit dieser Richtstätte in Verbindung zu bringen und die Trockenmauern als Wallbefestigungen der Richtstätte anzusprechen. Die Stelle „Beim Gericht" lag weiter südlich, gewissermaßen vor den Mauern des „alten Klosters".

Leukfeld kann mit der Bezeichnung „das alte Walkenried" nur die noch heute in Flurkarten mit „das alte Kloster" bezeichnete Stelle gemeint haben, denn auf diese paßt, wie schon gesagt, seine Beschreibung haargenau.

Die geringen Abmessungen der festgestellten Mauerzüge, ja die angeblich vorhandenen Wall- und Grabenanlagen, eine Ableitung des Wiedabaches, wenn solche nicht auf natürliche Weise durch Schuttablagerungen und Nachgrabungen entstanden sind, bestätigen doch nur das Alter und die einfache Bauart für einen noch kleinen Klosterkonvent; jedenfalls können sie auf das Vorhandensein eines Ortes „Alt-Walkenried" kaum gedeutet werden. Damit fällt aber auch die Annahme Steinackers, daß hier der Wirtschaftshof „Alt-Walkenried" gelegen haben könne, zumal ein solcher Wirtschaftshof südlich vom jetzigen Kloster auf der sogenannten Mauerwiese zwischen dem Kloster Walkenried und seinem Außenhofe Widigshof gelegen hat. Hier sind ebenfalls Mauerreste im Untergrunde vorhanden, die feste, massive, anscheinend sogar wehrhafte Gebäude getragen haben. Hier, inmitten des durch die Wieda befruchteten Wiesengeländes hatte ein solcher Hof auch Sinn; hier liegen heute noch ausgedehnte Weideflächen, die als „Schäferweide", „oberste und unterste Sauweide", „Itelbreite" und „Itelwiese" bezeichnet werden. —

Als im Herbst des Jahres 1900 zur Abstützung des den Einsturz drohenden südwestlichen Vierungspfeilers (Text-Abb. 2) der Walkenrieder Kirchenruine ein Strebepfeiler neu aufgeführt werden sollte, stießen die Arbeiter beim Ausschachten des Fundamentgrabens auf altes Mauerwerk, das sich bei näherer Untersuchung als Teil einer halbrunden Apsis mit einem äußeren Durchmesser von 8,50 m erwies (Abb. 8 Bl. 12). Es konnte keinem Zweifel unterliegen, daß die Chorapsis einer romanischen Kirche, die vor der in Ruinen auf uns gekommenen gotischen Kirche hier gestanden haben mußte, in den Fundamenten und im Sockel freigelegt war. Damit war bestätigt, was durch die romanischen Baureste auf dem jetzigen Klostergebiete vermutet werden mußte, daß die erste dauernde Niederlassung der Walkenrieder Mönche auf derselben Stelle sich befand, auf der wir heute die Ruinen finden.

Die weiteren Nachforschungen förderten im Anschluß an die große Apsis die Chormauern *abc* und *efg* zutage; während sich an letztere ein Zwillingspaar von Apsiden anschloß, von denen die eine noch vollständig erhalten, die andere aber in den Grundmauern nachzuweisen war. Jede der kleinen

8) Dr. Joh. Jaeger, Die Klosterkirche zu Ebrach. Würzburg, Stahelsche Verlagsanstalt, 1903, S. 10 ff.



Abb. 2. Walkenried. Südlicher Kreuzarm.[9])

Apsiden war etwa halb so groß als die Hauptapsis. Diese Doppelapsiden konnten nicht weiter auffallen, weil die Zisterzienser der Regel nach bei ihren Kirchenchören kleine Kapellen errichteten, die den Mönchen bei der strengen Observanz als Bußkapellen dienten. Dagegen war es sehr auffällig, daß die Zwillingsapsiden ein anderes Sockelprofil aufwiesen als die große Apsis, und daß der Baustoff derselben und die Mauertechnik Abweichungen zeigten. Während die Hauptapsis als Sockelprofil eine einfache steile Schräge (*a* Text-Abb. 3) aufweist, zeigt das Profil der Zwillingsapsiden (*b* Text-Abb. 3) eine Hohlkehle mit darunter befindlicher Wulst mit deutlichen Lisenensätzen an der Hohlkehle, und während der Baustoff des Sockels der Hauptapsis aus kristallinisch-feinkörnigem, festen Dolomit besteht und vorzüglich erhalten ist, besteht der Sockel der Nebenapsiden aus stark verwittertem losen Dolomit. Die Steine zu den Walkenrieder Klosterbauten wurden der Hauptsache nach den Brüchen auf dem Pontelberge, die für den Bau am günstigsten gelegen waren, entnommen. Erst später, Mitte des 13. Jahrhunderts, kommen die Brüche bei dem jetzt wüsten Widagerode bei Nixey in Frage. Auf dem Pontelberge befindet sich eine ganze Anzahl alter Steinbrüche, die zu verschiedenen Zeiten erschlossen, ein sehr verschiedenartiges Gestein lieferten.

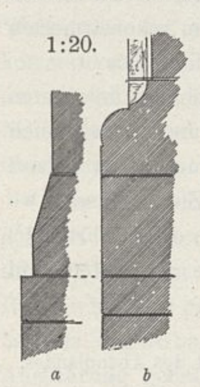


Abb. 3. Sockelprofile.
a Hauptapsis.
b Zwillingsapsiden.

9) Abb. 2, 6, 23 u. 24 nach Aufnahmen der Königl. Meßbildanstalt.

Auf der Nordseite der freigelegten Hauptapsis waren die Nebenapsiden nicht festzustellen; es dürfte aber keinem Zweifel unterliegen, daß sie auch hier vorhanden gewesen sind. Die weiteren Nachgrabungen ergaben die Mauerecke *klm* in gleicher Stärke und Ausführung wie die Hauptapsis mit den anschließenden Mauerzügen. Innerhalb des doppelten Kreuzgangflügels auf der Südseite der Kirche wurde der Mauerzug *on* freigelegt, der wiederum mit dem vorigen in der Ausführung und in den Abmessungen übereinstimmte, mithin ebenfalls ein Teil der romanischen Kirche sein mußte. Endlich wurde noch außerhalb der gotischen Kirche auf ihrer Südwestseite eine verhältnismäßig starke Mauer *pq* aufgefunden, die der Technik und dem Baustoff nach dem romanischen Kirchenbau angehört haben kann. Die Mauer scheint sich weiter nach Süden fortgesetzt zu haben, so daß sie nicht nur als Westmauer der romanischen Kirche, sondern auch als Westmauer der unmittelbar anschließenden Klausur angesprochen werden muß. — Die in Abb. 8 Bl. 12 mit *rs* innerhalb des gotischen Langschiffes und *tuv* im doppelschiffigen Kreuzgange freigelegten Mauern gehören, wie schon die Strebepfeileransätze der letztgenannten Mauer beweisen, der nachromanischen Bauzeit an; sie zeigen aber, daß man auch bei Beginn der gotischen Bauten nicht ganz klar über den zur Ausführung gebrachten Kirchenbau gewesen ist.

Was lehren die Funde? Zunächst, daß die Grundmauern einem Bauwerk angehört haben müssen, das vor der auf uns gekommenen Kirchenruine errichtet worden ist; ferner, daß dieses Bauwerk eine Kirche im romanischen Baustil gewesen sein muß, die verschiedenen Bauzeiten angehört hat. Der älteste Teil der romanischen Kirche ist in der Chorapsis mit den unmittelbar anschließenden Mauern *abcd* und *efg* gegeben. Wir finden hier vor der Hauptapsis eine verkürzte rechteckige Choranlage (Abb. 6 Bl. 12), wie sie die Kirche in Huyseburg[10]) (Abb. 1 Bl. 12) in dem Bauteil des 11. Jahrhunderts besitzt, wie sie ferner in dem 1011 geweihten Dome in Walbeck vorhanden ist. Gerade die verkürzte Choranlage dürfte für das hohe Alter dieses Bauteiles sprechen, dessen steile Sockelschräge und Mauertechnik auf das 11. Jahrhundert hinweist. Der verkürzte Chorraum ist im allgemeinen selten, besonders in Sachsen und Thüringen; bei Zisterzienserkirchen kommt derselbe überhaupt nicht vor.

Mit Recht weist schon Dohme[11]) darauf hin, daß die Gleichheit der rituellen Gebräuche, die Abhängigkeit der Töchterklöster vom Mutterkloster, der innige Zusammenhang der Klöster untereinander, die Genehmigung von Neugründungen und damit auch von Neubauten durch die Generalkapitel auf die Gleichmäßigkeit der Kirchenanlagen der Zisterzienser von Einfluß sein mußte. Die Regeln und Gebräuche des Ordens verlangten aber insbesondere eine entwickelte Choranlage. Als solche kann aber die von mir in Walkenried aus dem ersten Bauabschnitt aufgedeckte Choranlage nicht angesehen werden. Die in Abb. 6 Bl. 12 gegebene Rekonstruktion dieser Kirche läßt ersehen, daß die Tiefe des Chorrechtecks mit der Breite der Seitenschiffe übereinstimmt, ein Verhältnis, das auch mit den betreffenden Teilen der Huyseburger Kirche übereinstimmt (Abb. 1 Bl. 12).

10) Brinkmann, Zentralblatt der Bauverwaltung 1897.
11) Die Kirchen des Zisterzienserordens, Leipzig 1869.

Einem zweiten Bauabschnitt gehört der Mauerzug *klm*, sowie die Mauer *no* im doppelschiffigen Kreuzgange, wie auch endlich der Mauerzug *pq* außerhalb der jetzigen Kirche an. Dieser Bauabschnitt ist offenbar durch eine Vergrößerung der ersten Kirche, die durch irgendwelche Gründe hervorgerufen war, veranlaßt. Ergänzen wir den Grundriß der Kirche dieses Bauabschnittes, so ist zu beachten, daß die Entfernung zwischen dem Mauerstück *ml* und der Chormauer *ab* (Abb. 8 Bl. 12) genau der Entfernung der Seitenmauern des Chorrechtecks entspricht, woraus zu schließen ist, daß der Mauerzug *klm* die nordöstliche Ecke des nördlichen Kreuzarmes gebildet hat; d. h. die Kreuzarme hatten dieselben Abmessungen wie die Vierung bzw. das Mittelschiff in der Breite des Chorrechtecks. Unter Zugrundelegung des Mauerzuges *no* ergibt sich ferner, daß die Seitenschiffe halb so breit sind als das Mittelschiff, die ganze Länge des Querschiffes aber zweimal in der ganzen Länge der Kirche enthalten ist (Abb. 5 Bl. 12). Die gedrückte Choranlage ist der letzte Rest der ersten Kirchenanlage und bestimmend gewesen auf die einfach T-förmige Form des Grundrisses.[12])

Ob die Stützen der Mittelschiffmauern Pfeiler oder Säulen gewesen sind oder beide Stützarten abwechselten, muß dahingestellt bleiben. Es ist aber wahrscheinlich, daß ein Stützenwechsel der basilikalen Anlage wie bei zahlreichen gleichalterigen Kirchen am Rande des Harzes, wie in Huyseburg, Drübeck, Goslar, Hildesheim und weiter ab in Gandersheim und Amelungsborn vorhanden war. Bei den Nachforschungen auf dem Gebiete der Walkenrieder Kirche fand sich das Deckgesims eines Stützenpfeilers (Text-Abb. 4a) mit dem alten Karniesprofil und einer kleinen Hohlkehle darunter, und eine Säulenbasis mit steilen Eckklauen (Text-Abb. 4b), die ebenfalls auf die Wende des 11. und 12. Jahrhunderts hinweisen. Überraschend aber war die Tatsache, daß die monolithen Säulenschäfte der Säulen des doppelten gotischen Kreuzganges (Text-Abb. 6) denselben Durchmesser besitzen wie die gefundene romanische Säulenbasis, und ebenso überraschend war die weitere Tatsache, daß diese Säulenschäfte aus einem anderen Gestein als die sonstigen gotischen Bauglieder hergestellt sind. Während diese Bauteile ausschließlich aus Dolomit vom Pontelberge bei Walkenried gearbeitet sind, bestehen die Säulenschäfte aus Muschel- oder Schaumkalk, der bei Walkenried überhaupt nicht vorkommt, mithin aus der Ferne nach Walkenried gebracht sein muß.[13]) Stellen wir die gefundene Basis mit einem der Schäfte zusammen, so ergibt sich, wenn das fehlende Kapitell ergänzt wird, eine romanische Säule (Text-Abb. 4c) von durchaus angemessener Form. Aus dieser romanischen Kirche dürften auch die roten und schwarzen Fußbodenfliesen stammen, die sich in verschiedenen Mustern in der Klostersammlung befinden und in Text-Abb. 5 wiedergegeben sind.

Da das Grundmaß der romanischen Kirche des zweiten Bauabschnittes bekannt ist, so läßt sich danach auch unschwer der Aufriß ableiten. Die Säulenschäfte haben zwar nur einen Durchmesser von 36 cm, die Basis hat nur eine Seitenfläche von 52 cm; der Längenschnitt (Abb. 4 Bl. 12) zeigt aber, daß die Säule sich durchaus harmonisch in das Gesamtbild einfügt und daß die Annahme einer Säulen-Pfeilerbasilika für unsere Kirche eine gewisse Berechtigung hat. Wenn ein passendes romanisches Kapitell zu dem monolithen Säulenschafte nicht gefunden ist, so erklärt sich solches mutmaßlich daraus, daß man bei dem Bau des gotischen Kreuzganges diese Kapitelle zu gotischen Säulenfüßen umarbeitete, denn tatsächlich besteht der obere Teil dieser Säulenfüße des gotischen Kreuzganges in passender Höhe des Kapitells ebenfalls aus Muschelkalk.

Einer dritten Bauzeit endlich gehören die Zwillingsapsiden neben der Hauptapsis an, die ein anderes Sockelprofil und anderen Baustoff aufweisen. Daß in ihnen zisterziensische Einflüsse zu erblicken sind, dürfte zweifellos sein; denn gerade die Chorseitenkapellen sind ein besonderes Merkmal der Zisterzienser. Ich neige daher der Annahme zu, daß diese Apsiden dem Bau angehört haben, der im Jahre 1137 mit besonderer Feierlichkeit eingeweiht wurde. Anders aber liegt die Sache bei den Bauten des ersten und zweiten Bauabschnitts, die nach dem örtlichen Befunde als Eigenbauten der Zisterzienser nicht angesprochen werden können. Nach den Geschichtsquellen hatte die Kirche in Walkenried sieben Altäre, St. Mariae, St. Mauritius, St. Godehardi, St. Alexandri, St. Benedicti, St. Martini und St. Michael, deren Unterbringung in dem rekonstruierten Grundriß (Abb. 5 Bl. 12) keine Schwierigkeiten macht.

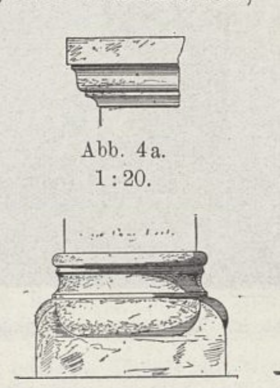


Abb. 4a. 1:20.

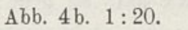


Abb. 4b. 1:20.

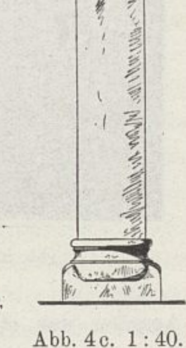


Abb. 4c. 1:40.

Wenn behauptet ist[14]), daß die Zisterzienser der ersten Zeit sich den örtlichen Bautypen angepaßt und deshalb auch in Walkenried nicht nach Zisterzienser-Grundsätzen gebaut hätten, so steht dem entgegen, daß die Zisterzienser, wo immer sie auftraten, ihre Baugrundsätze durchführten.[15]) — Nun ist aber die freigelegte Choranlage der ersten und

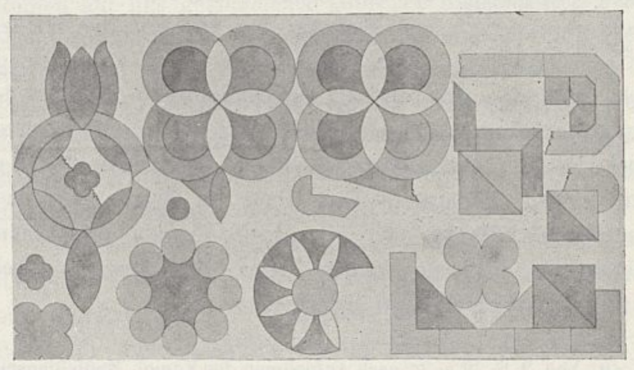


Abb. 5. Fußbodenreste der romanischen Kirche.

12) Der T-förmige Grundriß ist in Walkenried keine besondere Eigentümlichkeit; Adolf Zeller hat denselben auch bei der Kirche des Benediktinerinnenklosters St. Mariä auf dem Münzberge bei Quedlinburg festgestellt.

13) Nach der Untersuchung des † Professors Dr. Kloos der herzogl. Techn. Hochschule in Braunschweig.

14) Steinacker.

15) Dehio u. v. Bezold, Kirchliche Baukunst des Abendlandes.



Abb. 6. Walkenried. Kreuzgang.

zweiten romanischen Bauzeit in Walkenried so eigenartig, daß aus der Umgebung Walkenrieds, ja am ganzen Südrande des Harzes ein Beispiel, das als „örtlicher Bautypus“ angeführt werden könnte, nicht vorhanden ist. Auch ist es schlechterdings nicht wohl denkbar, daß die an eine freie Kirchenbauentwicklung gewöhnten Zisterzienser gerade in Walkenried auf einen damals schon veralteten Bauplan gekommen sein sollten, zumal dieser von den Benediktinern am Nordrande des Harzes zur Ausführung gebracht war, Zisterzienser und Benediktiner aber sich mißgünstig gegenüberstanden.

Zu den wichtigsten Baugrundsätzen der Zisterzienser gehören die Chorkapellen mit apsidialem oder flachem Abschluß; bis jetzt ist mir kein Beispiel aus der romanischen Bauzeit bekannt geworden, wo die Zisterzienser einen Kirchenbau als Eigenbau von Grund auf ohne diese Kapellen zur Ausführung gebracht hätten, die für ihre rituellen Gebräuche unerläßlich und nach Dehio auch bei dem ältesten Kirchenbau in Citeaux vorhanden waren. Wohl ist es in wenigen Fällen, in Deutschland nur in Heilsbronn in Franken und in Dissibodenberg an der Nahe, vorgekommen, daß Zisterzienser sich in aufgehobene Benediktinerabteien der romanischen Stilzeit eingesetzt haben.[16]) Heilsbronn und Dissibodenberg hatten aber bei ihren Kirchen den Hirsauer Chorschluß, der dem der Zisterzienser am nächsten kommt.

Es kann noch der Einwand erhoben werden, daß die Kleinheit des bei der Gründung vorhandenen Klosterkonvents — 12 Mönche ohne die Konversen — die Bußkapellen entbehrlich gemacht hätten und daß diese in Walkenried in der ersten und zweiten Bauzeit nicht erforderlich gewesen wären; dem steht aber entgegen, daß bei allen bekannten Zisterzienserkirchen als Eigenbauten Bußkapellen nachgewiesen sind, deren Zahl mit dem Wachsen des Klosterkonvents zunimmt, so daß schließlich, wie in Citeaux (zweiter Bau), in Ebrach und in Riddagshausen, wie in Walkenried, wie ich noch nachweisen werde, ein vollständiger Kranz von Kapellen um den Chor sich legt.

Die Annahme[17]), daß der erste Kirchenbau in Walkenried nur eine Kapelle, ein Oratorium oder Bethaus gewesen sei, ist deshalb nicht haltbar, weil die erste Siedlung während des Klosterbaues nicht an der jetzigen Stelle, sondern $^1/_4$ Stunde nördlich auf dem Ackerplane „das alte Kloster“ gelegen hat. Dazu kommt, daß die Abmessungen der großen Apsis so bedeutend sind (8,50 m), daß sie unmöglich einem kleinen Bethause, gewissermaßen als Notkapelle, angehört haben können; auch würde man in damaliger Zeit schwerlich einen Massivbau für das vorübergehenden Zwecken dienende Gebäude aufgeführt haben.

Der Annahme, daß die Zisterzienser, als sie nach Walkenried kamen, bereits Baulichkeiten vorfanden, steht auch der Bericht über den um 1124 erfolgten Güteraustausch nicht entgegen; denn wenn der auf Befehl des Abtes Alfrid von Huyseburg im Jahre 1131 verfaßte Bericht über den Austausch vorhandene Baulichkeiten nicht weiter erwähnt, so kann solches nicht auffallen, weil diese Baulichkeiten ein selbstverständliches Zubehör des Gutes waren und mit diesem der Gräfin Adelheid zurückgegeben wurden. Besonders auffallend aber ist es, daß die Geschichtsquellen nur von einer Kircheneinweihung im Jahre 1137, die mit besonderem Glanze vollzogen wurde, berichten, von vorhergehenden Kircheneinweihungen aber nichts zu melden wissen. Ebenso ist es kaum denkbar, daß die Zisterzienser seit ihrem Einzuge in Walkenried im Jahre 1129 in dem kurzen Zeitraume von acht Jahren zwei verhältnismäßig große massive Kirchenbauten fast vollständig neu und einen Erweiterungsbau (Zwillingsapsiden) zur Ausführung gebracht haben könnten. Daß die von den Zisterziensern vorgefundenen Kirchenbauten von den Benediktinern beeinflußt gewesen sind, dürfte aus dem Vorstehenden hervorgehen; ob es Klosterbauten oder Kirchen des Ortes Alt-Walkenried gewesen sind, mag dahingestellt bleiben.

Durch die Vermehrung des Grundbesitzes und durch die Urbarmachung des Riets hoben sich die Einkünfte des Klosters und stieg das Ansehen desselben im Reiche. Der Klosterkonvent war in stetem Wachsen begriffen, so daß im Anfange des 13. Jahrhunderts ein vollständiger Neubau

16) Dobrilugk und Otterberg gehören dem 13. Jahrh. an.

17) Steinacker.

des Klosters erforderlich wurde. Im Jahre 1209 fand in Walkenried ein Generalkapitel von 52 Äbten deutscher Zisterzienserklöster statt, dem auch Kaiser Otto IV. beiwohnte. Ob Otto IV. den Grundstein zu den Neubauten gelegt hat, wie mehrfach angenommen ist, kann nicht nachgewiesen werden; daß aber der Neubau bei dieser Gelegenheit zur Sprache und Erörterung gekommen ist, dürfte sicher sein.

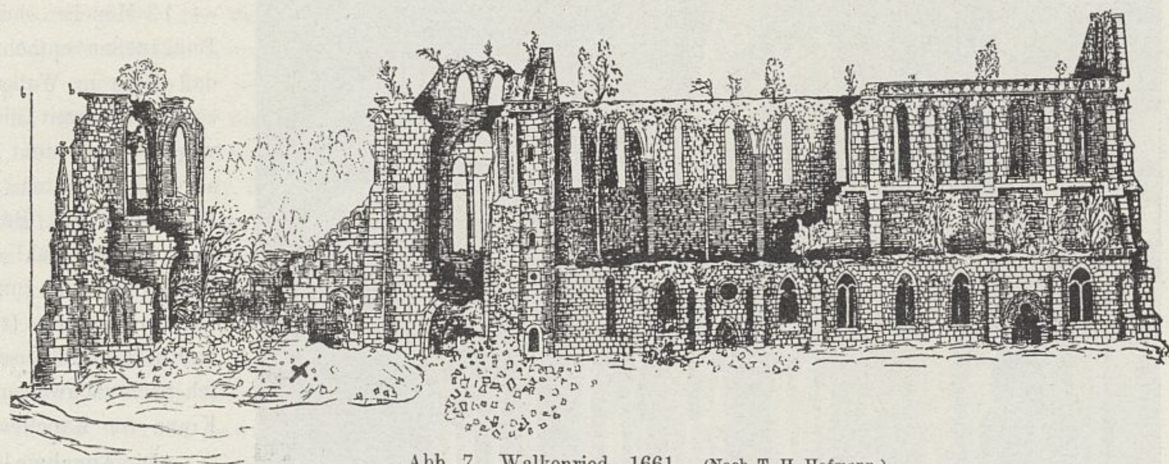


Abb. 7. Walkenried, 1661. (Nach T. H. Hofmann.)

Der alte romanische Kirchenbau wurde so lange als irgend möglich beibehalten und der Neubau vom Chore her begonnen, wie dies auch sonstwo in damaliger Zeit üblich war. Von diesem Neubau stammen die Reste, die stellenweise in gefahrdrohender Beschaffenheit noch erhalten sind. Der gefahrdrohende Zustand aber rechtfertigt es, die Baureste in eingehender und gewissenhafter Weise zu durchforschen, um noch, gewissermaßen in letzter Stunde, ein einigermaßen klares Bild von dem, was vorhanden gewesen, zu erhalten. Über die bauliche Gestaltung des Langhauses mit der noch verhältnismäßig gut erhaltenen Westseite können Zweifel kaum bestehen. Die Chorruine bildet dagegen den kunst- und baugeschichtlich bemerkenswertesten Teil der Anlage.

Der gegenwärtige Bestand der Chorruine ergibt folgendes: Auf der Nordseite (Abb. 8 Bl. 12) sehen wir Mauerzüge, die teils in den Grundmauern, teils über der Oberfläche erhalten, rechteckig geschlossenen Kapellen angehört haben; bei zwei dieser Mauern sind sogar noch die Leibungen der Türöffnungen vorhanden, die deutlich beweisen, daß hier tatsächlich geschlossene Kapellen vorhanden gewesen sind. Auf der Südseite sind die Kapellen nur noch in den Grundmauern nachzuweisen.

An der Nordostecke des nördlichen Chorseitenschiffes ist das Fundament eines mächtigen Strebepfeilers von 2,15 m Breite freiliegend und im Verband mit der östlichen und nördlichen Chorseitenschiffmauer nachzuweisen, der den Schlüssel zu der ursprünglichen Anlage in Verbindung mit den Kapellenmauern bildet. Ferner ist im Chormittelschiff eine Grundmauer $x—y$ von 1,30 m Breite erhalten, die von Norden nach Süden streichend, etwa in der Achse eines später vorgebauten starken, in den Fundamenten erhaltenen Strebepfeilers des nördlichen Chorseitenschiffes liegt. Endlich ist noch östlich von dieser Mauer der Ansatz einer Kapellenscheidemauer freigelegt, die allerdings nach Osten zu in ein breiteres und späteres Fundament, augenscheinlich des Hochaltars, übergeht. Seitlich dieses Mauerrestes ist noch ein Stück des alten Gipsfußbodens erhalten, der wahrscheinlich als Unterlage für einen Tonfliesenboden gedient hat.

In diesen Bauresten haben wir ohne Zweifel den ältesten Bauplan des Chores der Walkenrieder Kirche vor uns, und für die Baugeschichte und Rekonstruktion dieses ersten Bauabschnittes ist der große Strebepfeiler von besonderer Bedeutung. Steinacker hat diesen Strebepfeiler gänzlich übersehen, Hermann Giesau führt ihn zwar in seinem Rekonstruktionsversuche auf, hat aber die Bedeutung desselben nicht erkannt; beide Verfasser haben sich dadurch zu ganz unhaltbaren Schlüssen verleiten lassen.

Die bedeutende Stärke des Strebepfeilers läßt sofort erkennen, daß er für die Chorneben- oder -umbauten keine Bedeutung gehabt haben kann, denn für diese hätten zur Aufnahme des Gewölbedrucks erheblich bescheidenere Abmessungen genügt. Der Pfeiler kann, zumal in seiner diagonalen Stellung, nur den Zweck gehabt haben, über die Seitenkapellen nebst Umgang hinweg den Druck des Mittelchorgewölbes aufzufangen, dessen Ostmauer über der Fundamentmauer $x—y$ (Abb. 8 Bl. 12) gelegen haben muß. Mit anderen Worten: um das rechteckig geschlossene Altarhaus des Hochchores legte sich ein Kranz von 12 Kapellen, die durch Mauern voneinander abgeschlossen waren. Diese Kapellen wurden dann noch durch $2 \times 2 = 4$ Kapellen an der Ostseite der Kreuzarme auf im ganzen 16 gebracht (Abb. 7 Bl. 12). Das rechteckige Altarhaus war gewölbt, denn sonst hätte der große Strebepfeiler keinen Sinn gehabt; das Gewölbe hätte als vierteiliges vollständig genügt, kann aber sehr wohl auch ein sechsteiliges, wie bei den Gewölben im Langschiff, gewesen sein, zumal der kleine Strebepfeiler auf der Außenwand des nördlichen Chorseitenschiffes auf die Übertragung des Druckes der Mittelrippe des sechsteiligen Gewölbes schließen läßt. In der Achse der Kapellenscheidemauern finden sich sonst die kleinen Strebepfeiler nicht, wie auch aus einer alten Zeichnung bei T. H. Hofmann aus dem Jahre 1661 (Text-Abb. 7), auf die später noch eingegangen werden soll, hervorgeht, weil hier die Scheidemauern selbst zur Auf-

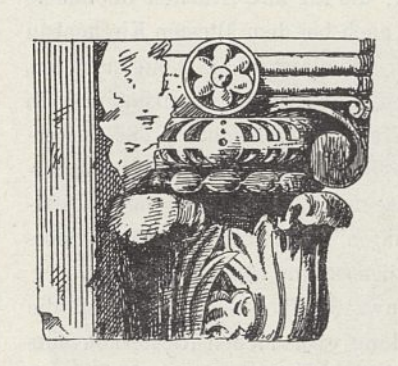


Abb. 8. Walkenried.

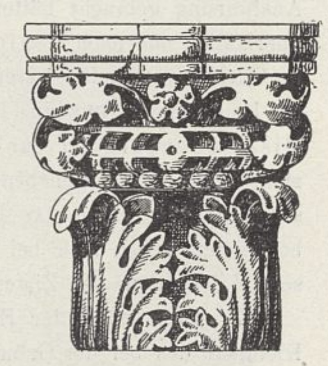


Abb. 9. Dom in Magdeburg. Bischofsgang.

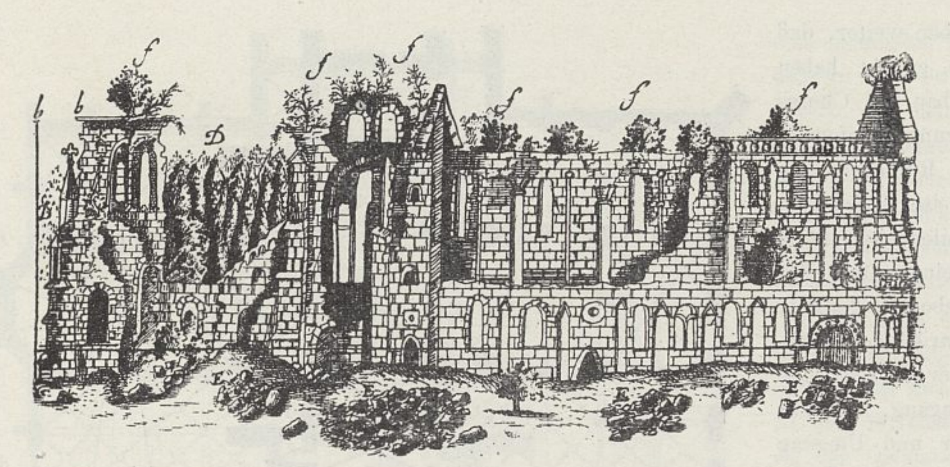


Abb. 10. Walkenried, 1706. (Nach Leukfeld.)

nahme des Druckes der Gewölbe des Umgangs und der Kapellen genügten.

In den vier Ecken dieses Hochchorgewölbes müssen die eigenartigen Kapitelle gesessen haben, die später den Gewölbediensten des Chorpolygons aufgesetzt wurden. Eins dieser Kapitelle sitzt noch an Ort und Stelle im polygonalen Chor, zwei derselben sind in der Stiftssammlung erhalten. Die letzteren lassen deutlich erkennen, daß sie ursprünglich für einen rechteckigen Raum bestimmt gewesen (Text-Abb. 8) und erst später dem Achteckswinkel entsprechend umgearbeitet sind. Auf diese Kapitelle hat zuerst der verstorbene Baurat Wiehe hingewiesen, dann hat sie M. Hasak mit den gleichartigen Kapitellen im Bischofsgang des Domes in Magdeburg verglichen[18]) und endlich P. J. Meier unter Beifügung eines Kapitells aus der St. Afrakapelle des Domes in Speyer zu einer bemerkenswerten Studie[19]) gemacht. Alle diese Kapitelle zeigen die gleiche Akanthusform, den umgebildeten Eierstab und verkümmerte Voluten, die in Magdeburg an einem Kapitell (Text-Abb. 9) sogar frühgotische Blattform annehmen. Ob die Vorbilder im Heiligen Lande zu suchen und diese Kapitellformen mit den Kreuzzügen nach Frankreich und Deutschland gekommen sind, wie Hasak[20]) vermutet, ist schon denkbar; anderseits ist es bei der Übertragung burgundischer Bauformen nach Deutschland durch die Zisterzienser nicht unwahrscheinlich, daß diese Kapitelle nach Deutschland erst über Frankreich gekommen, wo sie ebenfalls und bei noch älteren Bauten nachzuweisen sind. Die früher geäußerte Ansicht, daß es sich um antike Kapitelle handelt, ist bereits durch Hasak widerlegt; der Baustoff ist in Walkenried Dolomit, also ein einheimischer, so daß schon hierdurch der Herstellungsort bezeugt ist.



Abb. 11. Klosterkirche Riddagshausen.

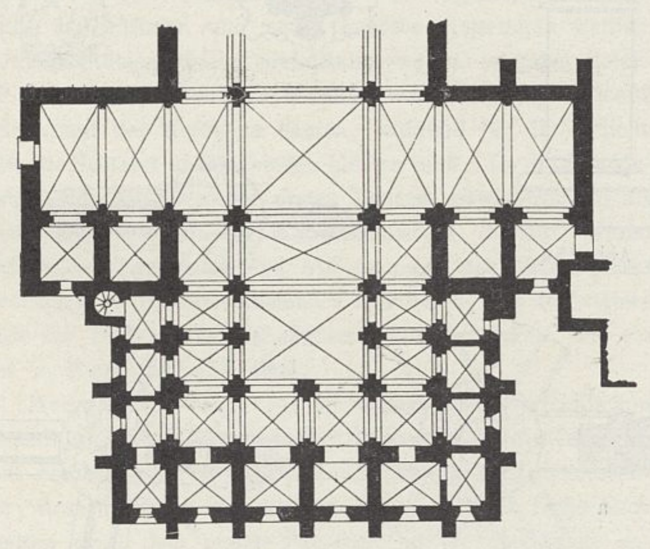


Abb. 12. Klosterkirche Ebrach bei Bamberg. (Nach Dr. Jäger.)

Neben dem großen Eckstrebepfeiler muß aber noch ein anderer Strebepfeiler den entsprechenden Gewölbedruck des Mittelchorgewölbes aufgenommen und mittels Schwippbogens über Seitenkapellen und Umgang hinweg übertragen haben. Dieser Pfeiler kann nur an der Nordostecke der östlichen Seitenkapelle des Querschiffes gestanden haben, denn auf der östlichen Umfangsmauer dieser Kapellen würde er den Wasserabfluß der Kapellendächer an dieser Stelle verhindert haben. In der Tat zeigt auch die Hofmannsche Zeichnung an dieser Stelle den Stumpf eines starken Strebepfeilers (bei × Text-Abb. 7). Steinacker scheint diesen Strebepfeilerrest nicht erkannt oder nur die bei Leukfeld gegebene Abbildung im Auge gehabt zu haben, wenn er hier nur einen Schutthaufen sieht, der einem nachträglich vorgelegten breiten Notpfeiler zugewiesen wird. Hier muß aber auf den Unterschied aufmerksam gemacht werden, der zwischen der Hofmannschen Zeichnung und der bei Leukfeld (Text-Abb. 10) gegebenen besteht; denn da, wo Hofmann den Strebepfeilerrest deutlich gezeichnet hat, gibt Leukfeld nur einen großen Trümmerhaufen. Beide Zeichnungen können ein richtiges Bild geben, nur ist zu beachten, daß Hofmann den Zustand der Chorruine von 1661, Leukfeld aber vom Jahre 1706 oder wenig früher wiedergibt und in dem Zeitunterschiede von mehr als vierzig Jahren sehr wohl ein weiterer Verfall der Ruinen hat eintreten können.

18) Zentralblatt der Bauverwaltung 1897, S. 552.
19) Braunschweig. Magazin 1904, S. 13ff.
20) Beilage d. Staatsanzeigers f. Württemberg 1912, S. 349ff.

Der große Eckstrebepfeiler lehrt nun aber weiter, daß Kapellen und Umgang gleiche Gewölbehöhe gehabt haben müssen, denn sonst wäre zweifellos der Aufbau des Chores in derselben staffelförmigen Weise zur Ausführung gekommen, wie wir sie in Ebrach bei Bamberg und in Riddagshausen (Text-Abb. 11) in besonders auffallender Weise beobachten können; dann aber wäre der große Strebepfeiler nicht nötig gewesen, der eben nur in Verbindung mit einem über Kapellen und Umgang hinweggehenden Strebebogen denkbar ist. Daß der staffelförmige Aufbau in Walkenried von vornherein nicht geplant gewesen ist, beweist ferner die schwache Trennungsmauer zwischen Kapellen und Umgang, die zur Aufnahme des Gewölbedruckes vom Hochchor und Umgang zu schwach gewesen wäre. Daß die Ostmauer des Hochchores schwächer ist als die Umfangsmauern der Chorkapellen auf der Nord- und Südseite, wird dadurch erklärlich, daß in derselben keine Weihwassernischen vorhanden waren.

Es ist nun lehrreich festzustellen, daß die Walkenrieder Choranlage der ersten gotischen Bauzeit in der Grundrißanordnung — in den Abmessungen nicht ganz — mit dem gleichen Bauteile der Zisterzienser-Klosterkirche in Ebrach bei Bamberg (Text-Abb. 12) übereinstimmt; hier wie dort haben wir zwölf Kapellen um den rechteckigen Chor und vier Kapellen an den Kreuzarmen, während Riddagshausen nur vierzehn Umgangskapellen besitzt. Die erste Bauanlage in Ebrach ist aber älter als die in Walkenried, deren Beginn zwischen 1209 und 1215[21]) zu setzen ist. Es wäre also wohl denkbar, daß der Ebracher Baumeister auch Walkenried gebaut hat; jedenfalls dürfte Maulbronn für den ersten Chorbau des 13. Jahrhunderts für Walkenried noch nicht in Frage kommen. Dagegen ist es nicht ausgeschlossen, daß beide Anlagen, Ebrach und Walkenried, unabhängig voneinander, von burgundischen Architekten geplant und beide gleichartigen Grundrisse das Nachbild von Citeaux sind.

Ob in Walkenried der volle Kapellenkranz auch im Aufbau zur Ausführung gekommen und wann hier eine Planänderung eingetreten ist, mag vorläufig dahingestellt bleiben. Für den Aufbau war es gleichgültig, ob geschlossene Kapellen oder zweischiffige Hallen den Hochchor begrenzten. Die Rekonstruktionszeichnung der Ansicht des Chores im ersten Bauabschnitt (Text-Abb. 14) gilt daher auch für den zweiten.

Ganz unbegründet aber ist die Annahme Dr. Steinackers, daß die Kapellenmauern nachträglich in die zweischiffigen Hallen des Chores eingebaut wären, um die „wankenden Mauern“ des Hochchores zu stützen. Vom Hochchorgewölbe wurde der Druck nur auf die einerseits durch die Strebebögen und Pfeiler, anderseits durch die Außenmauern der Querschiffkapellen gegebenen festen Punkte übertragen.

Der zweite Bauabschnitt der Walkenrieder Choranlage umfaßt den 1290 geweihten Bau; dieser wird durch die Aufgabe der geschlossenen Kapellen und Umwandlung derselben in zweischiffige Hallen, also auch an der Ostseite, bestimmt (Text-Abb. 13). Konstruktive Schwierigkeiten standen dieser Umwandlung nicht entgegen, selbst wenn man annehmen will, Umgang und Kapellen wären schon gewölbt gewesen und der erste Chorbau bereits vollständig zur Ausführung

21) Steinacker S. 33.

Abb. 13. Zweiter Bauabschnitt. 1 : 600.

0 5 10 20 30m

Abb. 14. Walkenried. Erster und zweiter Bauabschnitt. Rekonstruktion. 1 : 400.

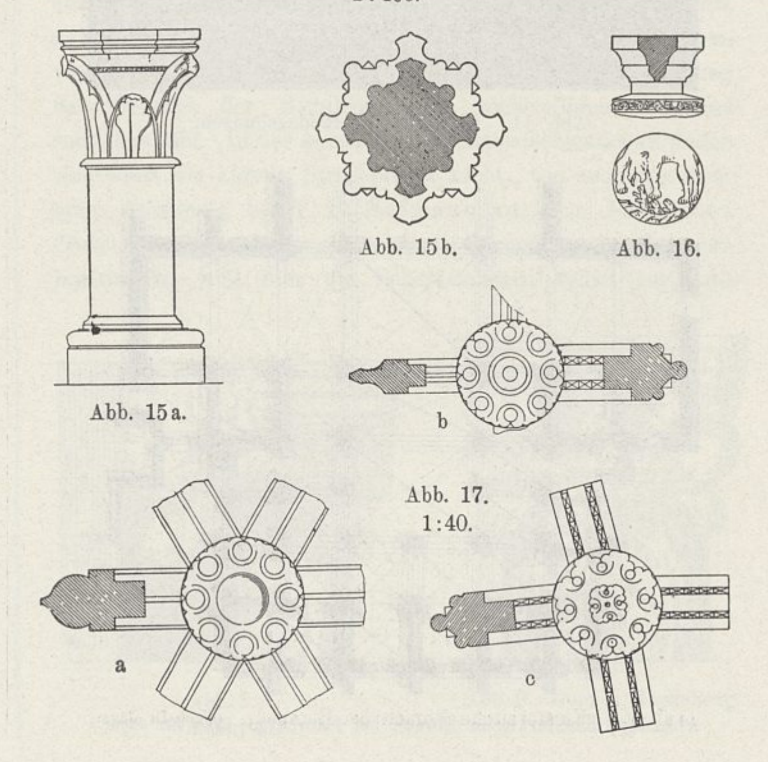


Abb. 15a. Abb. 15b. Abb. 16. Abb. 17. 1:40.

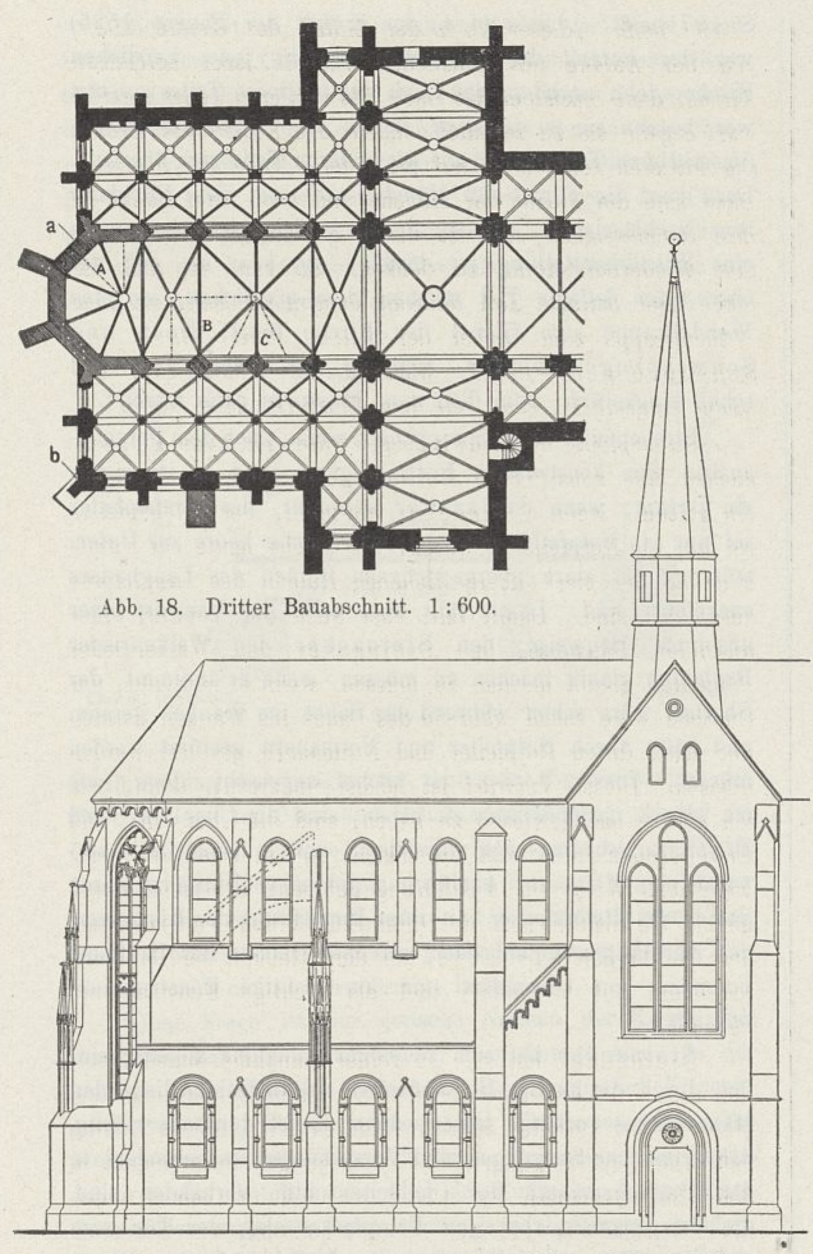


Abb. 18. Dritter Bauabschnitt. 1 : 600.

Abb. 19. Walkenried. Chor. Dritter Bauabschnitt. Rekonstruktion. 1 : 400.

gekommen. Denn da der Druck des Hochchorgewölbes unabhängig von den Chorumbauten durch Strebebögen und Strebepfeiler aufgenommen wurde, konnten die Gewölbe der Kapellen und des Umgangs sowie die Kapellenmauern beseitigt und Stützen und neue Gewölbe eingezogen werden. Ob diese Stützen Pfeiler oder Säulen waren, ist dabei gleichgültig; nach dem heutigen Befunde waren auf der Südseite Pfeiler, auf der Nordseite Säulen, während für die östliche Halle die Stützart unentschieden bleiben muß. Da die Scheidemauern der Kapellen der ersten Bauzeit gewissermaßen als innere Strebepfeiler der Kapellengewölbe dienten, waren Strebepfeilervorlagen an den Außenmauern des Chorumgangs nicht nötig; als die Scheidemauern aber fielen, war die weitere Folge die Herrichtung der äußeren Pfeilervorlagen, wie sie noch in Resten erhalten sind.

Hermann Giesau hat in seiner sonst vortrefflichen Abhandlung die Kapellenmauern der nördlichen Chorseite nicht beachtet und ist der Meinung, daß der südliche Nebenchor, dessen äußere Abschlußwände in geringer Höhe noch erhalten sind, dem ersten Bauabschnitt der Choranlage angehört habe. Er meint auch, daß die im südlichen Nebenchor stehenden Gewölbeanfänger zu den quadratischen Pfeilersockeln mit 80 cm Sockelseite gehören, obgleich er selbst angibt, daß man einige Zentimeter von dem 69 cm betragenden Durchmesser der Anfängerstücke abziehen müsse. Meines Erachtens stehen diese Anfänger nicht an der ursprünglichen Stelle; sie gehören vielmehr in das nördliche Chorseitenschiff zu den hier vorhanden gewesenen Säulen von 44 cm Durchmesser und achteckigem Abakus (Text-Abb. 15 a u. b).

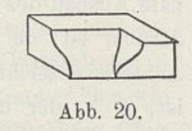
Da auch Giesau die Funktion des großen Eckstrebepfeilers entgangen ist, kommt er zu der willkürlichen Annahme von zwei großen Strebepfeilern auf der Ostseite und zu dem Rekonstruktionsergebnis, daß das Chormittelschiff bis zu der Ostmauer in der Flucht der Ostmauern der Chorseitenschiffe durchgeführt gewesen wäre, so daß nur an beiden Seiten des Mittelschiffes zweischiffige Hallen hätten vorhanden sein können. Das ist auch nach dem von mir festgestellten Baubefunde ein Irrtum.

Der dritte Bauabschnitt (Text-Abb. 18) ist der polygonale Ausbau des Hochchores. Während H. Giesau im Zweifel darüber ist, ob das mit drei Seiten vorspringende, aus dem Achteck gezeichnete Chorpolygon im Grundrisse ursprünglich ist, d. h. der ersten Bauzeit angehört, glaubt Dr. Steinacker diese Frage unbedingt bejahen zu müssen. Der von Steinacker übersehene große Eckstrebepfeiler gibt aber den untrüglichen Beweis, daß kein polygonaler, sondern ein rechteckiger Chorabschluß vorhanden gewesen ist; erst als man im 14. Jahrhundert zu dem polygonalen Chorausbau überging, wurde dieser Strebepfeiler, dessen Strebebogen zur verlängerten Hochschiffsmauer schräg gestanden haben würde (Text-Abb. 19), überflüssig, dafür aber der von Giesau und Steinacker richtig als spätere Zutat erkannte Strebepfeiler an der Außenmauer des nördlichen Chorseitenschiffes (Text-Abb. 18) erforderlich; denn der Druck des vier- oder sechsteiligen Chorgewölbes vor dem Polygonanbau des Hochchores blieb bestehen und mußte nach Aufgabe des Eckstrebepfeilers in anderer Weise aufgefangen werden, zumal nunmehr auch ein Teil des Gewölbeschubes des Erweiterungsbaues die Stelle traf, wo der Eckstrebebogen ansetzte.

Daß dieser neue große Strebepfeiler ohne Verband vor die Mauer des Chorseitenschiffes gesetzt gewesen ist, kann nicht auffallen, es war konstruktiv sogar durchaus richtig, um bei dem ungleichen Setzen des neuen und alten Mauerwerkes keine Schäden in den letzteren hervorzurufen. Jeder einsichtsvolle Bautechniker verfährt heute noch in derselben Weise, und es beweist der vorliegende Fall nur, daß der Walkenrieder Meister ein sehr vorsichtiger Techniker gewesen ist. Er ist aber auch insofern ein tüchtiger Baumeister gewesen, als er von den vorhergehenden Bauten alles wieder zu verwenden bestrebt war, was nur irgend geeignet schien. Wir müssen ihm hierfür besonders dankbar sein, denn dadurch sind uns wichtige Konstruktionsteile und Zierglieder der älteren Kirchenbauten in Walkenried erhalten geblieben, wie das Fundament des großen Eckstrebepfeilers, die Kapellenmauern, die eigenartigen Hochchorkapitelle, der Rundbogenfries mit Diamantschnitt und Karniesprofil, die eigenartigen Gewölbeschlußsteine (Text-Abb. 16 u. 17) usw. Der Meister hat also ganz im heutigen Sinne restauriert. Daß hierbei das eine oder andere Zierglied umgearbeitet oder ergänzt werden mußte, ist selbstverständlich; hierher gehören die Schaftstücke der Eckdienste

im Polygon mit den angrenzenden Bogenfriesteilen unter der Sohlbank der gotischen Fenster, hierher gehört auch der Sockel des Polygonbaues mit dem auch bei dem älteren Bau vorhandenen umgekehrten Karniesprofil, der an den Anschlußstellen der Polygonseiten mit den östlichen Strebepfeilern natürlich umgearbeitet werden mußte; hierher gehört auch der von Steinacker veröffentlichte Gewölbeschlußstein (Text-Abb. 17b), der mit einem Durchmesser von 56 cm nur einem der Chorseitengewölbe angehört haben kann. Eine der vier Rippen zeigt noch das alte Profil mit Rundstäben und Diamantschnitt, während von den anderen drei Rippen nur noch eine erhalten ist und ein Profil des 14. Jahrhunders aufweist. Die von Steinacker veröffentlichten ganz ungewöhnlichen Profile der fehlenden Rippen habe ich nicht feststellen können.

Zur Unterstützung seiner Annahme, daß der Polygonausbau bereits dem ursprünglichen Chorbau angehört habe, weist Dr. Steinacker darauf hin, daß ein Sockelprofilquader (Text-Abb. 20) in der Ostmauer des südlichen Chorseitenschiffes an der Stelle *a* des Grundrisses (Text-Abb. 18) die Schmiege der anschließenden Polygonmauer besitzt, also beiden Bauteilen angehört haben müsse. Das ist aber nicht richtig, denn der Sockelquader sitzt, gleichwie ein weiter oben sitzender Flächenquader, der in beide Mauern einbindet nicht an der ursprünglichen Stelle.


Abb. 20.

Es rächt sich eben auch hier wieder das Übersehen des großen Eckstrebepfeilers, denn wenn dieses Versehen nicht passiert wäre, würde Steinacker bei einiger mathematischer Kenntnis wohl von selbst auf den Gedanken gekommen sein, daß dies bewußte Sockelstück mit dem Schmiegenansatz des Polygons dem unter gleichen Winkel zur Ostmauer der Chorseitenschiffe stehenden Eckstrebepfeiler (*b* in Text-Abb. 18) angehört haben müsse, das zu anderweitiger Verwendung frei wurde, als durch den Chorerweiterungsbau der Eckpfeiler überflüssig wurde. Da der Chorbau aus dem regelmäßigen Achteck konstruiert ist, so sind die Polygonseiten wie auch der Strebepfeiler an der Nordostecke unter 45^{0} geneigt; die Wiederverwendung an der bezeichneten Stelle machte also keine Schwierigkeiten. Die übrigen Sockelsteine waren aber durch die Aufgabe des älteren geraden Chorschlusses gewonnen und brauchten nur ergänzt zu werden.

Außer den von Steinacker angeführten Steinen bindet keiner in beide Bauteile ein, es ist vielmehr eine durchgehende senkrechte Fuge an dem Zusammenstoß der Polygonseite mit der Ostmauer des Chorseitenschiffes vorhanden, wodurch allein schon die Annahme Steinackers hinfällig wird. Giesau hat daher ganz recht, wenn er sagt, der örtliche Befund stände der Annahme des Polygons als ursprünglicher, erster Bau des Chores entgegen. Steinackers abfällige Kritik der Giesauschen Ausführungen im „Magazin" ist daher ganz ungerechtfertigt. Der infolge des polygonalen Erweiterungsbaues erforderlich gewordene Strebepfeiler der Nordmauer des Chorseitenschiffes hatte den Zweck, an Stelle des Eckstrebepfeilers den Gewölbedruck des Mittelchores aufzunehmen; er mußte also mit einem Schwippbogen über das doppelschiffige Chorseitenschiff hinweg den Druck übertragen. Daß ein solcher Schwippbogen vorhanden gewesen ist, bezeugt auch Eckstorm, bei dem es S. 197 heißt: „dieses (d. h. der Einfall der Bauern 1525) war der Anfang des gänzlichen Verfalls jener herrlichen Kirche: denn nachdem das Dach des mittleren Teiles zerstört war, begann sie zu zerfallen, indem das Fehlen des Daches (im mittleren Teile) auch auf die anderen Teile sich übertrug. Dazu kam die Flucht der Mönche und nach ihrer Rückkehr ihre Nachlässigkeit, die sie davon abhielt, früh genug an eine Wiederherstellung zu denken. So kam es, daß der obere oder östliche Teil mitsamt dem nördlichen, wo eine Wendeltreppe zum Giebel der Kirche führt, Dach und Schwippbogen verlor, während die Wände zum Teil schon eingestürzt, zum Teil dem Einsturze nahe waren".

Strebepfeiler und Schwippbogen waren nach dem Polygonausbau eine konstruktive Notwendigkeit, und es ist sicher ein Irrtum, wenn Steinacker annimmt, der Strebepfeiler sei nur ein Notpfeiler gewesen, wie solche heute zur Unterstützung der stark übergewichenen Ruinen des Langhauses ausgeführt sind. Damit fällt aber auch der Vorwurf einer unsoliden Bauweise, den Steinacker den Walkenrieder Bauleuten glaubt machen zu müssen, wenn er annimmt, der Chorbau wäre schon während des Baues ins Wanken geraten und hätte durch Notpfeiler und Notmauern gestützt werden müssen. Dieser Vorwurf ist höchst ungerecht, denn, wie ich glaube nachgewiesen zu haben, sind die Chor-Um- und Erweiterungsbauten wohl durchdacht und in konstruktiv einwandfreier Weise zur Ausführung gebracht. Übrigens waren gerade die Zisterzienser mit ihrer Einrichtung der Konversen, der werktätigen Laienbrüder, auf dem Gebiete der Baukunst besonders gut bewandert und als tüchtige Konstrukteure bekannt.

Steinacker hat sich zu seiner Annahme augenscheinlich durch die heutige Beschaffenheit des in Ruinen liegenden Mauerwerkes verleiten lassen; denn es ist durchaus richtig, daß erhebliche Senkungen und Versackungen insbesondere in den Umfangsmauern der Chorseitenschiffe vorhanden sind, die beispielsweise bei den Kämpferkonsolen der Tür vom südlichen Kreuzarm in die angrenzende Sakristei etwa 14 cm betragen. Diese Verschiebungen im Mauerwerk sind aber erst aufgetreten, als die Mauern des schützenden Daches beraubt und als Steinbruch benutzt wurden. Schnee und Regen konnten ungehindert in das Innere des Kirchenraumes gelangen und bei Tauwetter oder bei starken Regengüssen floß das Wasser in sich bildenden Rillen an bestimmten Stellen der Mauern in das Erdreich, löste hier den Gipsmörtel auf und verursachte so die ganz unregelmäßigen Versackungen im Mauerwerk. An solchen Stellen war der Mörtel, wie bei der Untersuchung hat festgestellt werden können, zu einer breiartigen, widerstandslosen Masse geworden. Dieser Befund darf aber nicht dazu führen, anzunehmen, daß bereits der noch unter Dach befindliche ganze Chorbau, d. h. vor der Zerstörung im Bauernkriege, derartige Senkungen, wie Steinacker behauptet von Nordwesten nach Südosten, gezeigt und zu besonderen Schutzvorrichtungen gegen Einsturz geführt habe. Dort, wo das Tagewasser nicht auf den Gipsmörtel hat einwirken können, ist derselbe auch hart und widerstandsfähig geblieben. Bei der Ausführung der Grundmauern sind die Walkenrieder Bauleute mit der gleichen Sorgfalt vorgegangen, die sie für den Aufbau verwendet haben. Es wird hierauf später zurückzukommen sein.

Richtig ist es, daß der innere Sockel der Wand- und Schiffspfeiler im Chor und Querschiff erheblich tiefer liegt, als im Langhause; aber es wäre falsch, diesen Unterschied in der Höhenlage auf ein gleichmäßiges Setzen der Chormauern zurückführen zu wollen. Der Unterschied beträgt 30 bis 40 cm; er ist wegen der Versackungen des Chormauerwerkes genau nicht zu bestimmen. Dementsprechend hat auch die ursprüngliche Fußbodenlage im Chore tiefer als im Langhause gelegen (Text-Abb. 21); später, nach der

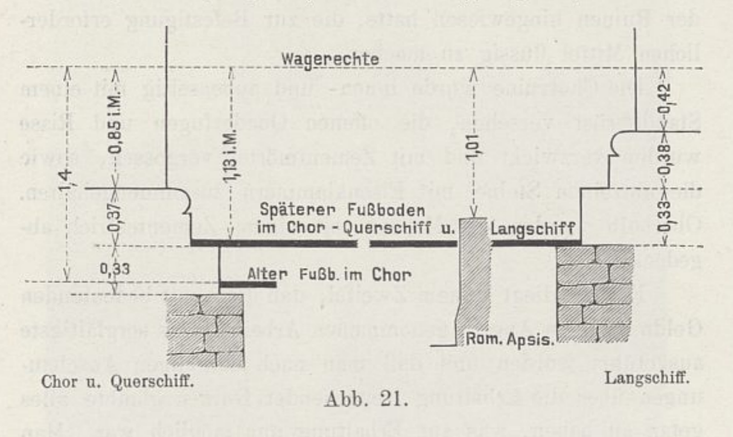


Abb. 21.

Fertigstellung des Langhauses, hat man augenscheinlich die Fußbodenlage im Chor und Schiff ausgeglichen, so daß im Chor der Sockel entsprechend niedriger wurde als im Schiff. Der alte Fußboden im Chor zeigt ein rautenförmiges Muster von kleinen rechteckigen, etwa 11 cm breiten roten Tonfliesen, während der spätere Fußboden aus größeren Tonplatten, aber nicht rautenförmig, besteht.

Ohne Frage ist der gotische Neubau der Kirche mit dem Bau des Chores begonnen; man konnte also, da der gotische Chor erheblich außerhalb des romanischen Kirchengebäudes liegt, dieses während des Chorbaues noch eine längere Zeit beibehalten. Als dann die romanische Kirche fallen mußte, hat man die über den Fußboden des gotischen Chores hervorragende Apsis nicht ganz abgetragen, sondern in einer gewissen Höhe, die selbst über den späteren Langschiffsfußboden noch hervorragte, stehen gelassen.

Hierdurch erklärt es sich auch, daß das Mauerwerk der romanischen Apsis so tadellos erhalten und in seiner oberen Schicht fast wagerecht abgeglichen ist. Der Grund, weshalb man die Mauern der Apsis über dem Querschiffsfußboden sichtbar stehen ließ, kann m. E. nur der gewesen sein, daß man das hier befindliche Grab der Stifterin oder eine anderweit besonders geweihte Stelle nicht anrühren wollte, die freigelegt worden wäre, wenn der Fußboden des Langschiffes dieselbe Tiefenlage bekommen hätte als das Querschiff und der Chor. Es war also ein für die damalige Zeit wohlverständliches Pietätsgefühl, das zu der außergewöhnlichen Anlage geführt hat.

Wenn es wohl entschuldbar ist, daß Dr. Steinacker sich durch den schon mit bloßem Auge sichtbaren Höhenunterschied zwischen Chor und Langhaus hat verleiten lassen, eine Senkung des Gebäudes nach Südosten anzunehmen, so ist es unverständlich, wenn er die „exponierteste Druckstelle“ an dem Anschluß der südlichen Polygonmauer des Chormittelschiffes an die Ostmauer des südlichen Chorseitenschiffes, bei *a* (Text-Abb. 18) sucht. In dem Grundriß sind die verschiedenen Belastungsflächen des Chorgewölbes angegeben; ein Blick darauf lehrt, daß an der von Steinacker bezeichneten Stelle der kleinste Gewölbedruck (*A*) stattfindet. Dazu kommt, daß gerade an dieser Polygonecke ein Strebepfeiler zur Aufnahme des Druckes vorhanden gewesen ist, der seinen Stützpunkt auf der Ostmauer des Chorseitenschiffes hatte. Die „exponierteste Druckstelle“ war ohne Frage an jener Stelle, wo der Schwippbogen des nördlichen großen Strebepfeilers sich an die Hochchormauer legte, d. h. bei *B* des Grundrisses.

Zur Begründung der unsoliden Bauweise der Zisterzienser Bauleute führt Steinacker endlich noch an, daß in der Südwand zwischen Polygon und südlichem Chorseitenschiff ein Mauerriß vorhanden sei, der, mit Ziegelbrocken ausgefüllt, schon vor der Zerstörung der Kirche im Bauernkriege bestanden haben müsse. Dieser Riß verschwindet aber nach unten und ist ganz ungefährlich, zumal er sich unter der großen spätgotischen Fensteröffnung befindet; die nachträgliche Ausmauerung des Risses mit Ziegelbrocken kann als genügender Beweis für sein Alter nicht angesehen werden. Auch die nachträgliche Ausmauerung des großen gotischen Fensters kann nicht weiter auffallen, denn sie ist offenbar nur aus dem Bestreben hervorgegangen, diese Fensteranlage mit den aus der ersten oder zweiten Bauzeit stammenden Fenstern in Übereinstimmung zu bringen. Der Baumeister brachte hier die beiden Fenster wieder an, die aus der Beseitigung der geraden östlichen Hochchormauer, die bei der Chorerweiterung fallen mußte, gewonnen waren.

Die Steinackersche Ansicht über den Verfall der Walkenrieder Kirche ist also nicht richtig; ebenso unrichtig ist es aber, den Untergrund für den Verfall verantwortlich machen zu wollen, denn derselbe besteht aus herzynischem Schotter. Mit herzynischem Schotter bezeichnen die Geologen die mächtigen Schutt- und Geröllablagerungen, welche die dem Harze entströmenden Gewässer vor Jahrtausenden niederfallen ließen, während sie sich den Weg in den vorliegenden Schichten bahnten. Der im Laufe der Jahrtausende hartgepreßte Schotter besitzt eine Mächtigkeit von 30 bis 300 m, so daß er als erstklassiger Baugrund angesehen werden muß. Auch die Wieda hat man für den Verfall der Kirche verantwortlich machen wollen. Der Wiedabach ist aber durch einen über 6 m breiten Damm im Harzschotter von der östlichen Chorruine getrennt, so daß nur bei Überschwemmungen das Wasser bis an die Chormauern herangetreten sein könnte. Ein Aufsatz in der Zeitschrift „Der Harz“ 1899 weist darauf hin, daß der Gipsmörtel, mit dem die Fundamente hergestellt sind, durch das Wiedawasser ausgewaschen sein könnte, weil „einmal, vielleicht während des Dreißigjährigen Krieges, der Flußlauf der Wieda aufgestaut war und der ihm zunächst stehende Teil des Gebäudes der Klosterkirche, wo der Hochchor steht, überschwemmt wurde“. Von einem solchen, doch immerhin bedeutenden Wasserschaden wissen die Geschichtsquellen nichts zu melden, auch zeigt der Verlauf der Risse der Chorruine, daß erhebliche Veränderungen in den Fundamenten nicht vorgekommen sein können. Daß jedoch Schnee und Regen kleine Rinnsale in den Schuttablagerungen des Kircheninnern an einzelnen Stellen der Fundamente gebildet haben werden, ist früher schon gesagt, und daß, wenn das Regenwasser immer wieder an diesen Stellen abläuft, der Gipsmörtel schließlich aufgeweicht werden mußte, ist

jedem Techniker klar. Wie schon der Name Riet vermuten läßt, war auf der Baustelle des Klosters ein verhältnismäßig hoher Grundwasserstand vorhanden. Dem haben die Zisterzienser beim Bau auch Rechnung getragen, indem sie die unteren Schichten unmittelbar über dem festen, tragfähigen Boden ohne Mörtel versetzt, die Baugrube dann aber mit Ton ausgestampft haben, so daß die Bewegungen des Grundwassers nach Möglichkeit von dem Trockenmauerwerk abgehalten wurden. Jedenfalls ein weiterer Beweis, wie sorgfältig die mittelalterlichen Bauleute in Walkenried, die sicher den Einfluß des Wassers auf den Gipsmörtel gekannt haben, zu Werke gegangen sind. Erst in einer Höhe, auf die der Grundwasserstand keinen Einfluß mehr haben konnte, beginnt das Mörtelmauerwerk und hört die Tonstampfung auf. Dieser Befund (Text-Abb. 22) ist nicht nur im Chor, sondern auch an der noch lotrecht stehenden Westmauer der gotischen Kirche festgestellt.

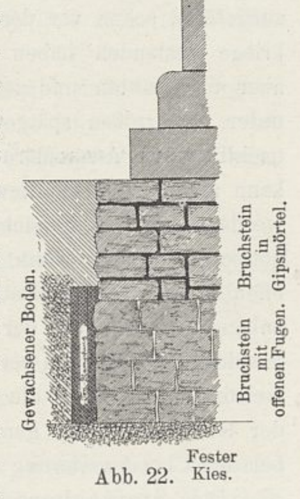


Abb. 22.

Die einzige Ursache für den Verfall der stattlichen Kirche ist ganz allein der Bauernkrieg im Jahre 1525; wäre die Kirche von der Wut der Bauern verschont geblieben, so stände dieselbe heute noch als ein hervorragendes Baudenkmal des Mittelalters, ebenso sicher und gut erhalten wie zahlreiche andere Zisterzienserkirchen, die von einer Zerstörung verschont geblieben sind.

Nachdem Dach und Gewölbe eingestürzt und bei den auf kurze Zeit zurückkehrenden Mönchen die nötigen Mittel nicht vorhanden waren, die durch den Bauernaufstand hervorgerufenen bedeutenden Schäden zu beseitigen, und auch später nichts geschah, um den Einwirkungen der Witterung Einhalt zu tun, verfielen die Mauern immer mehr. Bis 1570 konnte jedoch noch Gottesdienst in einem Teile der Kirche abgehalten werden; dann stürzte auch hier das Gewölbe ein, und der Gottesdienst wurde in den Kapitelsaal des Klosters verlegt, der noch heute der Ortsgemeinde als Gotteshaus dient. Wie in der Mitte des 17. Jahrhunderts die Kirche ausgesehen hat, zeigt uns die bereits erwähnte Hofmannsche Abbildung vom Jahre 1661; die Leukfeldsche Zeichnung aus dem Anfang des 18. Jahrhunderts ist anscheinend nach der Hofmannschen angefertigt, zeigt aber doch einige Abweichungen.

In dem offenen Kirchenraume nisteten sich Walkenrieder Einwohner ein, die aus dem vorhandenen Material sich Häuser bauten. Die Kirche diente als willkommener Steinbruch; noch im Jahre 1712 wurden 200 große Werkstücke zu einem Pfeiler an die St. Blasiuskirche in Nordhausen abgegeben.[22]) Profilierte Steine aus Walkenried findet man noch heute als Grenzsteine auf der Landesgrenze oder als Ecksteine in Gebäuden auch in außerhalb Walkenrieds gelegenen Ortschaften.[23]) Die geschichtliche und kunstgeschichtliche Bedeutung der Walkenrieder Klosterbauten war bei den nüchternen Anschauungen der damaligen Zeit vollständig verloren gegangen. Erst als im August 1862 ein Sturm die Ruinen stark beschädigt hatte, so daß befürchtet werden mußte, die geringste äußere Einwirkung könne den vollständigen Einsturz der Mauern herbeiführen und die innerhalb der Ruinen wohnenden Menschen beschädigen, dachte man daran, das Mauerwerk zu sichern. Aber erst 1870 gelang es den Bemühungen der Herzogl. Braunschweigischen Baudirektion, die vorher wiederholt schon auf die Bedeutung der Ruinen hingewiesen hatte, die zur Befestigung erforderlichen Mittel flüssig zu machen.

Die Chorruine wurde innen- und außenseitig mit einem Standgerüst versehen, die offenen Quaderfugen und Risse wurden verzwickt und mit Zementmörtel vergossen, sowie die einzelnen Steine mit Eisenklammern zusammengehalten. Oberhalb wurden die Mauern mit einem Zementestrich abgedeckt.

Es unterliegt keinem Zweifel, daß diese mit bedeutenden Geldmitteln in Angriff genommenen Arbeiten aufs sorgfältigste ausgeführt wurden und daß man nach damaligen Anschauungen über die Erhaltung freistehender Ruinen glaubte alles getan zu haben, was zur Erhaltung nur möglich war. Man kannte noch nicht die zerstörende Wirkung des Zements und legte der Ausdehnung der Eisenklammern bei Hitze und Kälte keine Bedeutung bei. Aber in die feinen Haarrisse des Zementestrichs, in die gelockerten Fugen der Eisenklammern drang das Regenwasser ein, das bei Frostwetter die Fugen und Quadern auseinandersprengte. Durch die Einwirkungen der Witterung im Sommer und im Winter, durch Sturm und Regen, Eis und Schnee verbogen sich die Mauern und lösten sich in den oberen Teilen vollständig von den Strebepfeilern los (Text-Abb. 23 u. 24). Die großen Mauerstücke zwischen den Fenstern neigten sich in erschreckender Weise nach drei Seiten auseinander, die Schwerpunktslinie war bedenklich überschritten, und die einzelnen Quadern wurden nur noch durch die Eisenklammern, soweit sie sich nicht schon losgelöst hatten, gehalten. Der Zustand der Chorruine war bereits in den 80er Jahren des vorigen Jahrhunderts wieder ein so bedenklicher geworden, daß der Zutritt zu derselben für das Publikum gesperrt werden mußte.

Bei einer Untersuchung der Ruinen durch den Geh. Oberbaurat, Professor Hase in Hannover und den Baurat Wiehe, als Vertreter der Herzogl. Braunschw. Baudirektion, wurde festgestellt, daß, wenn eine Umspannung der Chorruine durch Eisenträger und die Verankerung derselben mittels einer Kette an dem am anderen Ufer der Wieda liegenden sogenannten Kupferberge nicht ausführbar sei, nichts weiter übrig bleibe, als den Einsturz abzuwarten und die Ruinen mit dem alten Material wieder aufzubauen. Die eiserne Umklammerung und die Kette zum Berge sind glücklicherweise nicht zur Ausführung gekommen, weil zu erwarten stand, daß durch die fortwährenden Bewegungen der langen Kette bei Sturm und Wind die Chorruine sehr bald ihrem gänzlichen Verfall entgegen gegangen und die Geldmittel zu der Verankerung vergeblich aufgewendet gewesen sein würden. Daß auch vom künstlerischen Standpunkte die Verankerung als äußerstes Mittel nicht zu empfehlen gewesen wäre, ist wohl allen, welche die Ruinen in Walkenried kennen, klar; denn gerade in den freien verbogenen Linien,

22) Stübner I, 587.
23) Am Gasthaus „Zur grünen Tanne" in Wieda usw.



Abb. 23. Chorruine Walkenried. Südöstlicher Teil.

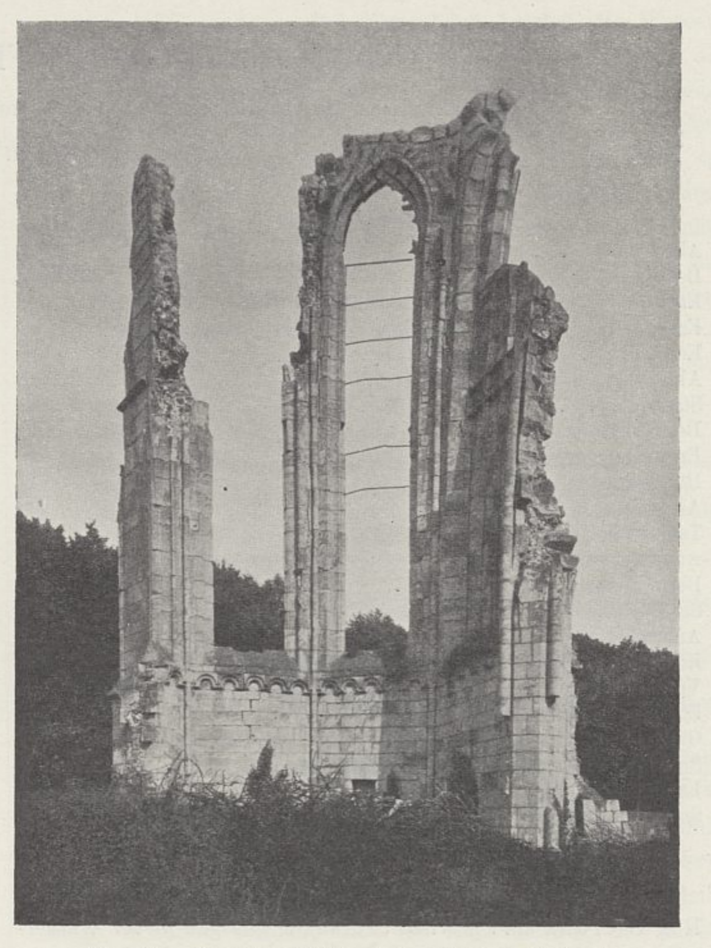


Abb. 24. Chorruine Walkenried. Heutiger Zustand.

den eigenartigen Verschneidungen derselben und in dem prickelnden Gefühl des nahenden Einsturzes, besonders wenn vorüberziehende Wolken das Mauerwerk in schwankende Bewegungen zu versetzen scheinen, liegt der Hauptreiz dieses verfallenen Bauwerkes.

Bei dieser Beschaffenheit der Chorruine konnte es kaum überraschen, daß der mittlere Teil derselben ohne jede äußere Veranlassung, bei vollständig windstillem und heiterem Wetter am 2. März 1902 nachmittags zum Einsturz kam, wodurch die Ruinen einen wesentlichen Teil ihres Reizes einbüßten. Glücklicherweise sind kurz vorher auf Veranlassung der Baudirektion in Braunschweig Meßbildaufnahmen von dem Walkenrieder Kloster durch den Geh. Baurat Dr. Meydenbauer von der Königl. Preuß. Meßbildanstalt in Berlin angefertigt, die einen genauen Befund der Baureste geben und geeignet sind, durch genaue geometrische Zeichnungen den Wiederaufbau der Chorruine auszuführen. Ob ein solcher Wiederaufbau gerechtfertigt ist, kann, da er den ursprünglichen Zustand der Ruine mit seiner malerischen Wirkung nicht wiedergeben kann, zweifelhaft sein. Hoffentlich liegt der Zeitpunkt der Entscheidung über diese Frage noch in weiter Zukunft.

Von den übrigen Teilen der Kirchenruine war besonders die teilweise noch erhaltene südliche Mittelschiffs-Arkadenwand und die anschließende Kreuzschiffsmauer gefährdet; durch vorgelegte Strebepfeiler, die jetzt mit rankendem Efeu und wildem Wein bepflanzt sind, dürfte die Gefahr des Einsturzes vorerst abgewendet sein. Als 1897 M. Hasak im Zentralbl. d. Bauv. gelegentlich eines Aufsatzes über Walkenried bemerkte, daß das reiche Braunschweiger Land seiner Verpflichtung hinsichtlich der Erhaltung der Ruinen als glorreiche Zeugen einer großen baukünstlerischen Vergangenheit nicht genügend nachkomme, veranlaßte die Herzogl. Baudirektion in Braunschweig die Zuziehung dieses Sachverständigen zur Abgabe eines Gutachtens über die Erhaltungsmöglichkeit und die Mittel zur Erhaltung insbesondere der am meisten gefährdeten Chorruine. Allein auch dieser Sachverständige ist nach eingehenden Untersuchungen an Ort und Stelle zu dem Ergebnis gekommen, daß bei diesem Bauteil nichts zu machen und der Einsturz abzuwarten sei. Das Ergebnis ist gewiß zu bedauern; glücklicherweise sind aber in den Trümmern und Ruinen noch so zahlreiche Einzelheiten erhalten, daß es für jeden, der es versteht in den Steinen zu lesen, nicht schwer halten wird, das Kloster, insbesondere aber die Kirche in allen Teilen zu rekonstruieren. Diese Rekonstruktionszeichnungen geben erst die richtige Grundlage auch zu einer kunstgeschichtlichen Wertung des Bauwerkes, auf die einzugehen einer späteren Abhandlung vorbehalten bleiben muß.

Schiffbarmachung von Flüssen durch Stauschleusen.

Von Geheimen Oberbaurat Dr.-Ing. Sympher und Regierungs-Baumeister Helmershausen.

(Mit Abbildungen auf Blatt 13 u. 14 im Atlas.)

Inhaltsverzeichnis.

Allgemeines.

Nicht nur der Schiffbarmachung der Flüsse durch Regulierung sind gewisse Schranken gezogen in der Wasserführung und dem Gefälle, auch die Kanalisierung kann praktisch nicht unbegrenzt stromaufwärts fortgesetzt werden. Mit wachsendem Gefälle steigt die Zahl der Schleusen, und mit diesen nehmen wiederum sowohl die Anlage- und Unterhaltungskosten als auch die Aufenthalte zu, welche für die Schiffahrt Zeit und Geld bedeuten. Unter Umständen wird daher die Schiffbarmachung des Flusses unmöglich und, wenn die örtlichen Verhältnisse oder mäßige Verkehrsmengen einen mit hohen Baukosten verbundenen Seitenkanal nicht rechtfertigen, muß von der Anlage eines Schiffahrtweges ganz abgesehen werden.

Diese Verhältnisse haben zu mehrfachen Vorschlägen geführt, kleinere Flüsse durch einfache Stauschleusen auch für größere Fahrzeuge benutzbar zu machen. In erster Linie kommt dabei eine Anregung in Frage, die der leider zu früh verstorbene bayerische Ministerialrat Heubach am 14. Mai 1897 im Zentralverein für Binnenschiffahrt gegeben hat. Danach soll der zu verbessernde Flußlauf durch den ganzen Flußquerschnitt sperrende Hubtore in kurze Abschnitte geteilt werden, wobei an jedem Tor oder an jeder Stauschleuse ein geringes Gefälle entsteht. Wird der Inhalt der oberhalb einer solchen Stauschleuse belegenen Flußhaltung so weit in die unterhalb belegene abgelassen, daß beide gleich hoch stehen, so kann das Tor gehoben werden und ein in der unteren Haltung befindliches zu Berg fahrendes Schiff ohne Aufenthalt in die obere Haltung eintreten. Wird dann das Tor wieder geschlossen und die obere Haltung durch Zufluß auf die Höhe der nächsten noch höheren Haltung gebracht, so kann das Schiff in gleicher Weise auch in diese gelangen usw. Ähnlich würde sich die Talfahrt von Schiffen vollziehen. Man kann also auf diese Art einen kleineren Fluß durch zahlreiche, aber im einzelnen billige Stauschleusen kanalisieren, ohne daß die Schiffe durch die Benutzung von Kammerschleusen einen unerwünschten Aufenthalt erleiden. Voraussetzung ist allerdings die Innehaltung bestimmter Geschwindigkeiten der Schiffszüge, damit diese immer dann vor einem Tore eintreffen, wenn dieses geöffnet ist.

Als vor einigen Jahren die Frage auftauchte, die Werra von Münden bis Wernshausen zu kanalisieren, erinnerte der an erster Stelle genannte Verfasser sich des Heubachschen Planes und erörterte ihn u. a. mit dem Geheimen Baurat Havestadt, dem Mitinhaber der bekannten Baufirma Havestadt u. Contag, welche von dem „Verein zur Schiffbarmachung der Werra" mit der Ausarbeitung eines Vorentwurfs beauftragt war. Havestadt brachte dem Gedanken große Beachtung entgegen und versuchte im Jahre 1907, ihn in einer Preisaufgabe der Akademie des Bauwesens weiter zu verfolgen. Dies ließ sich indes nicht verwirklichen, und so entstand der Vorentwurf für die Werrakanalisierung von Havestadt u. Contag in den üblichen Formen mit 46 einschiffigen Kammerschleusen auf 183 km Flußlänge. Nach den sonst üblichen Annahmen verursacht eine Einzelschleuse einem aus einem Dampfer und zwei Kähnen bestehenden Schleppzuge einen Aufenthalt, der an Zeit und Kosten einer Fahrtlänge von 8 km entspricht. 46 Schleusen verlängern also rechnerisch die auf der Werra 183 km betragende Entfernung von Münden bis Wernshausen um $8 \cdot 46 = 368$ km auf insgesamt 551 km. Da nun die Werra ohnehin viele Krümmungen aufweist und die Entfernung zwischen den genannten beiden Endorten in der Luftlinie nur 92 km, auf der kürzesten Bahnlinie nur 155 km beträgt, so sieht man, wie ungünstig die Schiffahrt durch den Einbau so vieler Schleusen beeinflußt wird. Hiernach würde an der Werra ein Fall vorliegen, wo ein Ersatz der Kammer — durch Stauschleusen am Platz sein könnte. Die Möglichkeit dazu ist daher an der Hand des von Havestadt und Contag bearbeiteten Kanalisierungsentwurfes nach dem ursprünglichen, aber im einzelnen weiter durchgebildeten Vorschlage Heubachs untersucht. Das Ergebnis möge — ohne damit zu der Frage der Zweckmäßigkeit der Schiffbarmachung der Werra selbst Stellung zu nehmen — im folgenden mitgeteilt werden, weil es in technischer Beziehung Interesse bieten dürfte und weil es erwünscht ist, die ganze Frage und ihre mögliche Lösung, sei es in der hier bearbeiteten, sei es in einer anderen Weise, zur Erörterung zu stellen.

Beschreibung der Werra.

Die Werra entspringt am Südwesthang des Thüringer Waldes in der Nähe von Eisfeld im Herzogtum Sachsen-Meiningen. Sie durchfließt die Talsenkung zwischen Thüringer Wald und Rhön-Gebirge, tritt dann zwischen Ringgau und Thüringer Wald hindurch in das Hessische Berg- und Hügelland ein, um zwischen Eichsfeld und Kaufunger Wald dem Zusammenfluß mit der Fulda bei Münden zuzustreben (Abb. 4 Bl. 14). An größeren Bächen nimmt die Werra in ihrem oberen Lauf oberhalb Wernshausen die Schleuse und Hasel, in ihrem

unteren Lauf die Hörsel und Ulster auf. Das Niederschlagsgebiet umfaßt einen großen Teil der erwähnten Gebirge und beträgt bei Wernshausen, dem obersten Punkte der zu kanalisierenden Strecke, 1642 qkm und bei Hedemünden, 10 km oberhalb Münden, 5505 qkm. Das niedrigste Niedrigwasser ist für Wernshausen zu 2 cbm/Sek. und für Hedemünden zu 7,1 cbm/Sek. ermittelt; bei höchstem Hochwasser fließen an den genannten Orten 400 bezw. 800 cbm/Sek. ab. Der vorhandene Flußquerschnitt vermag bei Wernshausen bordvoll nur etwa 82 und bei Hedemünden etwa 240 cbm/Sek. abzuführen. Geht die Wasserführung darüber hinaus, so wird das ganze Tal überflutet, da Einschränkungen durch Deiche nur ganz vereinzelt vorkommen, jedenfalls aber nicht planmäßig durchgeführt sind. Von einem bestimmten Querschnitt kann kaum gesprochen werden, weil der Fluß durch tiefe Kolke, Uferabbrüche und felsige Erhebungen in der Sohle teilweise stark verwildert und unregelmäßig ist. Die Wasserspiegelbreiten bei mittlerem Wasserstand wechseln in der oberen Kanalisierungsstrecke zwischen 36 und 50 m, in der unteren zwischen 40 und 78 m. Dementsprechend verschieden sind auch die Wassertiefen, welche, abgesehen von den Kolken, Unterschiede bis zu 2 m aufweisen. Das Flußbett ist im allgemeinen ziemlich tief in die Talsohle eingeschnitten, so daß das Niedrigwasser, wie aus dem Längenschnitt (Bl. 13) ersichtlich, eine reichlich tiefe Lage zum Gelände hat. Das durchschnittliche Gefälle beträgt auf der Strecke Wernshausen—Münden 1:1400 bis 1:1600, die Einzelgefälle sind jedoch sehr verschieden und wechseln zwischen 1:222 und 1:4500. Diese Unregelmäßigkeit hat zum großen Teil ihren Grund in den zahlreichen Mühlenstauen. Die unterste Strecke Wanfried—Münden ist für kleinere Fahrzeuge, jedoch nur unter großen Schwierigkeiten, schiffbar. Die vielen Stauwerke, die starken Flußkrümmungen und die meist alten steinernen Brücken mit kleinen Durchflußöffnungen und starken Pfeilern erschweren den Hochwasserabfluß. Wenn auch für die Wiesen, die Hauptkulturart der eigentlichen Talsohle, die düngenden Hochwasser vorteilhaft sein können, so haben größere Fluten nicht selten ganze Ortschaften in Gefahr gebracht und großen Schaden angerichtet.

Namentlich mit Rücksicht auf die Lage des Niedrigwassers zur Geländehöhe scheint es auch im Interesse der Landeskultur zu liegen, wenn der Fluß nicht durch wenige größere Staue, sondern in der Art kanalisiert wird, daß durch viele Staue von geringer Höhe ein dem natürlichen Gefälle der Talsohle folgender, fast während des ganzen Jahres gleichbleibender Wasserstand gehalten wird, der etwa dem Mittelwasser des Flusses entspricht.

Entwurf I. (Havestadt und Contag).

Der Kanalisierungsentwurf von Havestadt und Contag sieht 46 Staustufen mit 132,5 m Gesamtgefälle vor. Das Einzelgefälle der Schleusen schwankt zwischen 1,7 und 4,2 m. Die Schleusen sind einschiffig und haben 10 m Breite und 67 m nutzbare Länge. Die durchschnittliche Staulänge beträgt 4 km. Der Flußquerschnitt soll bei 18 m Sohlen- und 28 m Wasserspiegelbreite bordvoll, entsprechend dem H. S. W. (höchster schiffbarer Wasserstand), eine Wassertiefe von 2,50 m haben. Doch konnte diese Forderung auf der oberste Strecke Wernshausen — Barchfeld wegen der geringen Wasserführung nicht erfüllt werden. Bei Normalstau beträgt die Wassertiefe unmittelbar unterhalb der Staustufen nur 1,50 m; die Schleusendrempel sind so tief gelegt, daß die Flußsohle noch um 1 m vertieft werden kann. Die Unterkante der Brücken liegt mindestens 3 m über H. S. W. Die Wehre sind da, wo Neubauten erforderlich werden, als Walzenwehre ausgebildet, um den Flußquerschnitt bei Hochwasser möglichst schnell und vollkommen frei zu legen. Mit dem Wehr soll an den meisten Stellen eine Turbinenanlage zur Ausnutzung der Wasserkraft verbunden werden. Der Entwurf ist in den Längenschnitt (Bl. 13) in blau gestrichelten Linien eingetragen.

Die Kosten sind veranschlagt zu:

	Schiffbarmachung Mark	für 1 km Länge Mark	Kraftwerke (ohne Wehre) Mark	Zusammen Mark
a) Obere Strecke: Wernshausen—Hörschel, 72,2 km	15 950 000	221 000	1 725 000	17 675 000
b) Mittlere Strecke: Hörschel — Wanfried, 45,5 km	9 300 000	204 000	1 825 000	11 125 000
c) Untere Strecke: Wanfried—Münden, 63,75 km	13 750 000	216 000	3 450 000	17 200 000
d) Stichkanal nach Eisenach, 6 km	3 000 000	500 000		3 000 000
	42 000 000		7 000 000	49 000 000

Demnach soll die Kanalisierung der Werra allein, ohne Stichkanal nach Eisenach und ohne die Kraftwerke, etwa 215 000 Mark für das Kilometer kosten. Zum Vergleich möge erwähnt werden, daß die Kanalisierung der Mosel, deren Gefälle (0,32 m auf 1000 m) nur halb so groß ist wie dasjenige der Werra, auf etwa 308 000 Mark für das Kilometer veranschlagt ist.

Das Bestreben, die Baukosten möglichst niedrig zu halten, hat zu den oben beschriebenen Abmessungen geführt, die wohl für kleinere Verhältnisse, nicht aber für eine leistungsfähige Schiffahrtstraße genügen. Es erscheint aber nach anderweiten Erfahrungen angebracht, entweder auf einen Ausbau der Werra ganz zu verzichten oder dem Ausführungsentwurf die Verhältnisse einer leistungsfähigen Wasserstraße für 600 t-Schiffe zugrunde zu legen, letzteres um so mehr, als gerade in jüngster Zeit der Gedanke, die Verbindung zwischen Weser und Main durch das Werratal zu leiten und damit die Werra zu einer Durchgangsstraße für die Großschiffahrt zu machen, lebhaft erörtert worden ist.

Entwurf II. Umgearbeiteter Entwurf Havestadt und Contag.

Der Entwurf Havestadt und Contag ist also zunächst, ehe an einen Vergleichsentwurf mit Stautoren herangetreten wurde, so umgearbeitet worden, daß er den erweiterten Anforderungen entspricht. Im wesentlichen handelt es sich hierbei um folgende Abmessungen: Schleppzugschleusen 165 m lang und 10 m breit, Wassertiefe in den gestauten Haltungen mindestens 2,50 m, gestauter Flußquerschnitt zweischiffig mit etwa 62 qm Flächeninhalt und 34 m Wasserspiegelbreite unmittelbar unterhalb eines Tores, Durchfahrthöhe unter Brücken mindestens 4 m über H. S. W., Krümmungen möglichst nicht unter 500 m, in den Krümmungen Querschnittserweiterungen. In diesem Sinne ist zunächst eine Umarbeitung der oberen Strecke Wernshausen — Hörschel erfolgt und dann entsprechend auf die unteren Strecken angewandt worden. Eine Gegenüberstellung der Kosten für die obere

Strecke nach Entwurf I und II möge zeigen, wie sich die Kostenvermehrung auf die einzelnen Arbeiten verteilt.

		Entwurf I Mark	Entwurf II Mark
Tit. I.	Grunderwerb	726 000	1 442 000
	Abfindungen und Entschädigungen	824 000	1 300 000
„ II.	Erdarbeiten	3 140 000	7 200 000
	Uferbefestigungen	2 160 000	3 000 000
„ III.	Schleusen	7 055 000	9 371 000
„ IV.	Brücken	850 000	1 280 000
„ V.	Insgemein	1 195 000	1 807 000
		15 950 000	25 400 000

Die Gesamtkosten der oberen, 71 km langen Strecke nach Entwurf II betragen also 25 400 000 Mark oder 357 000 Mark/km. Wie aus der Kostenzusammenstellung für Entwurf I auf S. 122 hervorgeht, sind bei reiner Schleusenkanalisierung die durchschnittlichen Kosten für alle drei Strecken fast dieselben. Es kann daher überschlägig auch bei Entwurf II angenommen werden, daß für die mittlere und untere Strecke durchschnittlich dieselben Kosten entstehen wie für die obere. Die Kosten für die ganze 180 km lange Strecke Wernshausen—Münden würden dann $180 \cdot 357000 =$ rd. 64 000 000 Mark betragen. Hierzu kommen noch die Kosten für den Stichkanal nach Eisenach, welche sich etwa in demselben Verhältnis vermehren werden, wie die Kosten für die Hauptstrecke, also auf $3000000 \cdot \frac{357}{215} = 5000000$ Mark. Die Gesamtkosten des Entwurfes II belaufen sich dann auf 69 000 000 Mark, gegenüber 42 000 000 Mark des Entwurfes I.

Entwurf III. (Torkanalisierung).

Die allgemeinen Gesichtspunkte der Torkanalisierung nach der Heubachschen Anregung sind auf S. 119 erörtert worden. Im folgenden soll der Heubachsche Gedanke weiter entwickelt und auf die Verhältnisse der Werra angewandt werden.

Allgemeines. Der Betrieb einer solchen Anlage, wie er für die Werra in Frage kommt, möge zunächst an einem zu Tal fahrenden Schiffe A_1 erläutert werden. Dieses kann das Tor 1 passieren, wenn die Haltung 1 bis 2 gefüllt ist (vgl. Text-Abb. 1). Kurz nach der Durchfahrt wird 1 geschlossen und durch geringes Anheben des Tores 2 die Füllung a der Haltung 1 bis 2 in die Haltung 2 bis 3 abgelassen, wo sie alsdann den Platz b einnimmt. Bevor das Schiff an das Tor 2 gelangt, ist die Ausspiegelung zwischen den Haltungen 1 bis 2 und 2 bis 3 erfolgt, so daß das Schiff ohne Aufenthalt durch das geöffnete Tor 2 nach 3 weiterfahren kann. Kurz nach der Durchfahrt schließt sich 2; die Füllung b tritt an die Stelle c usw. So kann das Schiff mittels einer Haltungsfüllung — die Verluste abgerechnet — ohne irgendeinen Aufenthalt zu Tal fahren, sofern die Fahrzeit der Füllungszeit angepaßt wird und die Tore sich entsprechend bewegen. Ein weiteres Schiff A_2 kann erst in einem Abstand gleich der doppelten Torentfernung folgen.

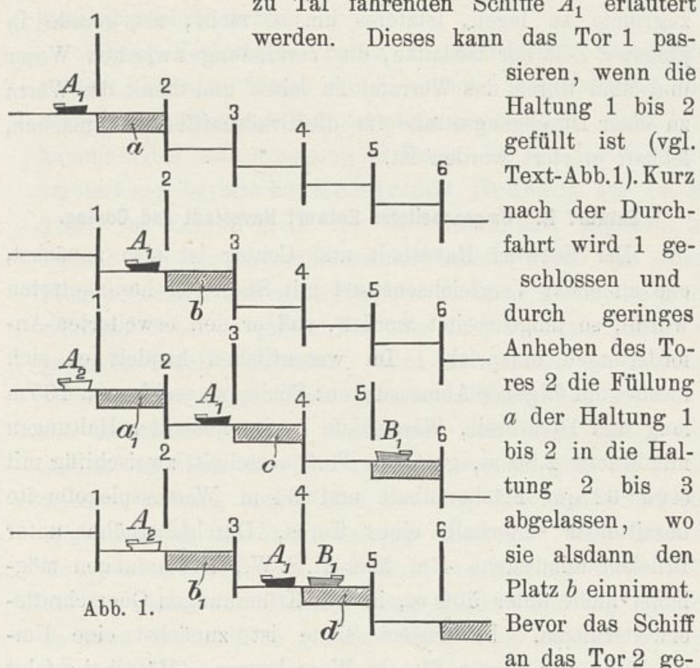


Abb. 1.

Während nun A_1 nach Öffnung des Tores 4 von 3 nach 4 fährt und um eine Stufe sinkt, kann gleichzeitig ein zu Berg fahrendes Schiff B_1, welches das Tor 5 durchfahren hat, von 5 nach 4 fahren und durch den Abfluß der Füllung c nach d um eine Stufe gehoben werden. Folgt A_2 dem Schiffe A_1 in der doppelten Torentfernung und in gleichen Abständen A_3 und A_4 usw. oder werden wenigstens dementsprechend die oberen Haltungen abwechselnd geleert und gefüllt, so wird auch B_1 ohne Aufenthalt zu Berg fahren können. Voraussetzung dabei ist aber, daß jedesmal in der Zeit, welche das Schiff zum Durchfahren einer Haltung benötigt, eine ganze Füllung von oben zufließen kann. Fließt mehr Wasser zu, als zum Schiffahrtsbetrieb nötig ist, so wird es durch Umläufe nebenbei abgeführt und, wenn dies nicht ausreicht, durch Anheben der Tore unter diesen hindurchgelassen. Die Anlage ist also dauernd in Betrieb, während sich die Schiffahrt je nach Bedarf einfügt.

Dem wechselnden Gefälle der Werratalsohle muß das Gefälle der Staustufen angepaßt werden, will man nicht zu tief ins Gelände einschneiden oder mit dem Wasserspiegel möglichst nicht über das Gelände kommen. Es müßte also nötigenfalls an gewissen Punkten ein Gefällwechsel stattfinden, welcher entweder eine Längen- oder eine Höhenänderung der Staustufen und damit eine andere Zeiteinteilung des oben beschriebenen Betriebes bedingen würde. Diese Unregelmäßigkeiten, die für Betrieb und Schiffahrt hinderlich sein können, sind zu vermeiden durch Einschaltung längerer Zwischenhaltungen oder gewöhnlicher Schiffahrtschleusen oder durch Verbindung dieser beiden. Text-Abb. 2 bis 4 veranschaulichen diese drei Möglichkeiten. In Text-Abb. 2 wird ein verhältnismäßig flaches Talgefälle durch zwei Tor-

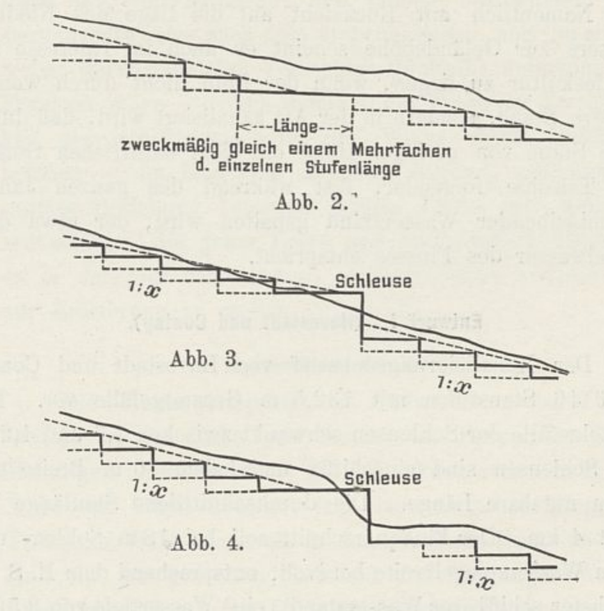


Abb. 2.

Abb. 3.

Abb. 4.

treppen von verhältnismäßig großem, aber untereinander gleichem Gefälle überwunden. Zwischen die unterste Stufe

der oberen Treppe und die oberste Stufe der unteren Treppe ist eine Zwischenhaltung mit einer Spiegelhöhe eingeschaltet, die, solange die Wasserführung des Flusses sich nicht ändert, immer gleichbleibt. Text-Abb. 3 zeigt, wie ein steiles Talgefälle durch verhältnismäßig flache Tortreppen mit Zwischenschaltung einer Schleuse überwunden werden kann. In Text-Abb. 4 endlich wird ein steileres Zwischengefälle durch Einfügung einer Schleuse ausgeglichen, an die sich oben und unten längere Haltungen anschließen. Das größere Gefälle an den Schleusen wird zweckmäßig zur Kraftgewinnung für die Bewegung der Tore und die Beleuchtung ausgenutzt. Ohnehin befinden sich an den natürlichen Gefällbrechpunkten meistens Orte, die durch natürliche und künstliche Wehre auf gewisse Wasserstände eingerichtet sind, und größere Mühlenanlagen, welche auf diese Weise erhalten werden. Die Ober- und Unterkanäle der Schleusen können mit ihren breiten Vorhäfen als Sammelbecken dienen zum Ausgleich der mit diesem Betrieb verbundenen unregelmäßigen Wasserführung und zur Aufspeicherung während der Betriebspausen.

Die einzelnen zwischen je zwei Schleusen liegenden Strecken werden zweckmäßig unabhängig voneinander betrieben, da eine bestimmte Durchschleusungszeit nicht genau eingehalten werden kann, der Aufenthalt der Schiffe an den Schleusen also verschieden sein wird. Die Schiffe müssen sich jedesmal von neuem in den Streckenbetrieb einfügen.

In diesem Sinne ist ein allgemeiner Entwurf III für die obere Strecke Wernshausen — Hörschel aufgestellt worden. Aus den hierfür ermittelten Kosten sollen, wie bei Entwurf I und II, die Gesamtkosten für die Strecke Wernshausen — Münden und den Zweigkanal nach Eisenach sinngemäß überschlägig bestimmt werden. Hierauf soll untersucht werden, wie sich die Schiffahrtkosten bei Anwendung der Torkanalisierung gegenüber der Schleusenkanalisierung stellen. Bei der Beschreibung und Begründung des Entwurfes wird Gelegenheit sein, die Annahmen des Entwurfes I zum Vergleich heranzuziehen und im einzelnen zu erörtern.

Abmessungen und bauliche Einrichtungen.

Querschnitt. Der Querschnitt entspricht dem Inhalt nach ungefähr demjenigen des Ems-Weser-Kanals (Text-Abb. 5), und zwar in der ungestauten Haltung unmittelbar oberhalb des unteren, in der gestauten unmittelbar unterhalb des oberen Tores. Der diesem Querschnitt entsprechende Wasserstand, 2,5 m über Sohle, soll mit N. W., Normal-Wasser, bezeichnet werden. Die 20 m breite Sohle ist nach der Mitte zu parabolisch um 50 cm vertieft. Die Uferböschungen sind auf 1 m Höhe 1:4, von da ab 1:3 geneigt.

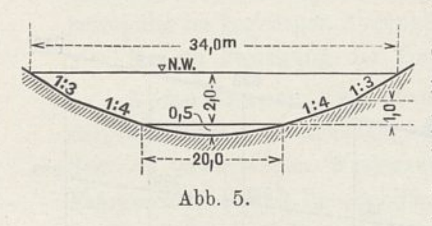


Abb. 5.

Die durchgehende Neigung 1 : 2 des Entwurfes I ist für den Querschnitt eines Kanals schon zu steil, für den eines kanalisierten Flusses aber, dessen Hochwasser nach wie vor durch das kanalisierte Bett mitabgeführt werden müssen, nicht möglich, auch wenn der Boden aus grobem Kies besteht. Trotz der gewählten schwächeren Neigung erscheint es sogar geboten, den oberen unter 1 : 3 geböschten Teil der neuen Uferböschungen zu befestigen (Text-Abb. 6). Ein entsprechender Betrag wurde in die Kostenberechnung eingesetzt. Der Wasserquerschnitt bei normalem Wasserstand beträgt 61,7 qm.

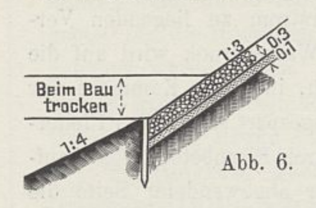


Abb. 6.

Krümmungen. Die Krümmungshalbmesser sollten tunlichst nicht unter 500 m hinunter gehen. Wo es ohne große Erdarbeiten irgend möglich war, ist an diesem Grundsatz festgehalten worden. An manchen Stellen mußte jedoch auf 300 m hinabgegangen werden, bei Herrenbreitungen (km 5) auf 280 m und bei Leimbach (km 18,5) sogar bis auf 275 m. In den meisten Fällen handelt es sich um kurze Krümmungen, welche der Schiffahrt kein Hindernis sein werden. Auch auf der Weser kommen derartige, ja sogar noch schärfere Krümmungen vor. Entwurf I hat sich, um an Erdarbeiten zu sparen, abgesehen von den Durchstichen, lediglich auf die Ausbaggerung des vorhandenen Stromschlauches beschränkt.

Verbreiterung. Bei allen Krümmungen ist im Gegensatz zu Entwurf I eine Verbreiterung vorgesehen worden, wenn die Erdarbeiten hierdurch auch, besonders in den Durchstichen, ganz erheblich vermehrt wurden. Die Verbreiterung erfolgt auf der dem Krümmungsmittelpunkt zugewendeten Seite und ist dem Halbmesser entsprechend abgestuft. Die Maße sind ungefähr dieselben wie beim Ems-Weser-Kanal, nämlich:

für	$r = 280$	bis	< 300	. . .	10 m
„	$r = 300$	„	< 350	. . .	9 „
„	$r = 350$	„	< 400	. . .	8 „
„	$r = 400$	„	< 500	. . .	7 „
„	$r = 500$	„	< 600	. . .	6 „
„	$r = 600$	„	< 700	. . .	5 „
„	$r = 700$	„	< 900	. . .	4 „
„	$r = 900$	„	< 1200	. . .	3 „
„	$r = 1200$	„	< 1500	. . .	2 „
„	$r = 1500$	„	< 2000	. . .	1 „

Schleusen. Die Schleusen sollen als Schleppzugschleusen gebaut werden und erhalten eine nutzbare Länge von 165 m (gegen 67 m im Entwurf I) und eine Breite von 10 m. Die Drempel sollen 50 cm unter dem tiefsten Punkt der Flußsohle, d. i. 3 m unter Normalwasser liegen, um einer späteren Vertiefung Rechnung zu tragen. Diese Abmessungen gestatten den Verkehr der auf dem Ems-Weser-Kanal und der Weser zulässigen Fahrzeuge von 65 bis 80 m Länge und 9 m Breite (ohne Scheuerleisten). Soll die Werra eine vollgültige Wasserstraße werden, dann darf sie den anschließenden Wasserwegen in den bestimmenden Abmessungen nicht nachstehen. Ober- und Unterkanäle sind als Vorhäfen mit reichlicher Breite und Länge ausgebildet, so daß sie die Versammlung und Bildung von Schleppzügen gestatten.

Brücken. Die Unterkante der Überführungen soll 4 m (gegen 3 m im Entwurf I) über dem höchsten schiffbaren Wasserstande liegen, die Durchfahrtbreite bei Neubauten mindestens 24 m betragen. Bei vorhandenen Brücken, deren Höhenlage genügt, ist von Fall zu Fall entschieden, ob ihre Durchfahrtweite (meistens zwei kleinere Öffnungen) genügt.

Stautore. Die Anordnung der Tore geht aus Abb. 1 bis 3 Bl. 14 hervor. Sie erhalten eine lichte Durchfahrtweite von 24 m. Der Stau beträgt 40 cm auf der Strecke Wernshausen — Hörschel und 50 cm auf der Strecke Hörschel — Münden, so

daß die Tore zeitweise einen Wasserdruck von 80 cm bezw. 1 m auszuhalten haben. Sie bestehen aus einer einzigen Schütztafel mit wagerechten, nach Unterstrom zu liegenden Versteifungsgitterträgern. Der ganze Wasserdruck wird auf die beiderseitigen Landpfeiler übertragen, in denen Kammern zur Aufnahme der Führungsschienen ausgespart sind. Über Pfeileroberkante werden diese Schienen durch Eisenbetongerüste aufgenommen, auf deren dem Wasser abgewendeter Seite die Gegengewichte laufen. Die Bewegung erfolgt durch einen in der Mitte der Tortafel auf dem Bedienungssteg aufgestellten Gleichstrommotor, welcher mittels einer wagerechten durchgehenden Welle auf die mit den Führungsschienen parallel laufende Zahnstange einwirkt. Der Motor hat nur den Wasserdruck und die auftretende Reibung zu bewältigen; das Torgewicht ist vollkommen ausgeglichen. Die Dichtung erfolgt dadurch, daß die Tortafel in der Sohle auf einer einbetonierten Schiene aufsitzt und sich an den Seiten nach Art der Rollschützen gegen die Pfeilernischen anlehnt. In den Landpfeilern sind weite (4 qm) Umläufe ausgespart, welche das überschüssige, nicht für den Schiffahrtsbetrieb nötige Wasser abführen sollen, solange der Fluß nicht mehr als etwa 20 cbm Wasser führt. Fließt mehr Wasser zu, so muß es durch entsprechendes Anheben der Tore unter diesen durchgelassen werden. Die Tore sind so stark gebaut, daß sie im Falle einer Unachtsamkeit im Bedienen bis 20 cm überströmt werden können. Ob die Umläufe ganz entbehrt werden können, soll noch an der Hand von Probeausführungen geprüft werden. Durch ausbalanzierte Rollschützen, welche elektrisch oder von Hand zu bedienen sind, kann der Wasserdurchfluß geregelt und stets der erforderliche Stau gehalten werden. Um die Kosten möglichst niedrig zu halten, erfolgt die Gründung in der einfachsten Weise durch eine von Ufer zu Ufer laufende Doppelspundwand aus Eisenbeton, welche nach unten auseinanderspreizt und oben einen 70 cm starken Betonkern zur Aufnahme der Eisenschiene einschließt. Die Doppelspundwand greift durch die Landpfeiler hindurch noch ein Stück in das Ufer ein und soll das Bauwerk gegen Unterspülung schützen. Ein Tonkern, welcher in das Ufer einbindet und an Pfeiler und Spundwand anschließt, sichert den Pfeiler gegen Hinterspülung. Die Flußsohle ist oberhalb des Tores durch ein 5 m und unterhalb durch ein 10 m breites und 50 cm starkes Betonbett mit darüberliegendem Steinpflaster in Zementmörtel befestigt. Diese Sohlenbefestigung wird nach Unterstrom zu durch eine weitere Spundwand von $2\,^1/_2$ m Länge abgeschlossen. Wo der Baugrund das Schlagen der Doppelspundwand nicht gestattet — aus den Unterlagen ist ein Anhalt hierfür nicht zu gewinnen —, wo also, wie in engen Flußtälern mit steilen Hängen häufig, nicht tief unter der Sohle Fels ansteht, muß die Betonschwelle unter dem Tor unmittelbar auf diesen gegründet werden.

Betriebsdauer. Die Tore müssen solange in Tätigkeit treten, als die Wasserführung der Werra in dem neuen Gerinne die Tiefe von 2,50 m über dem tiefsten Punkt der Flußsohle nicht von selbst zu halten vermag. Die Tore werden also auf den unteren Strecken, welche geringeres Gefälle und größere Wasserführung haben, eher ihren Betrieb einstellen und geöffnet bleiben können, als die Tore auf den oberen Strecken. Nach dem beigegebenen Längenschnitt (Bl. 13) sind für die Strecke Wernshausen — Hörschel drei verschiedene Gefällverhältnisse angenommen, 1:1400, 1:1500 und 1:1600. Für diese Gefälle soll diejenige Wassermenge Q ermittelt werden, welche bei freiem Durchfluß noch eine Wassertiefe von 2,50 m ergibt.

Allgemein ist $v = c\sqrt{R\cdot J} = \frac{Q}{F}$

$$Q = c\cdot F\cdot\sqrt{R\cdot J}\,; \quad R = \frac{F}{u}.$$

Nach Ganguillet und Kutter ist

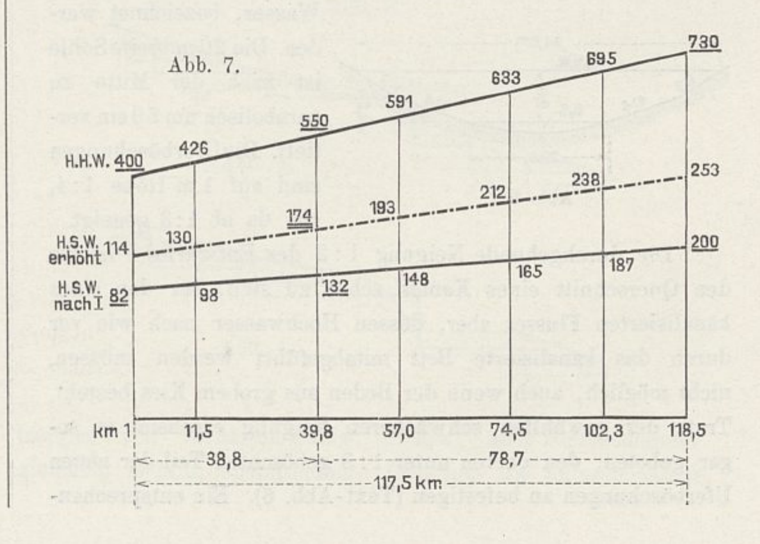
$$c = \frac{23 + \frac{1}{n} + \frac{0{,}00155}{J}}{1 + \left(23 + \frac{0{,}00155}{J}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}}.$$

Für die Werra kann n zu 0,025 angenommen werden. $F = 61{,}7$ qm; n, der wasserbenutzte Umfang, $= 34{,}382$ m; $\sqrt{R} = 1{,}34$.

Dann wird für

Gefälle 1:1400: $\sqrt{J} = 0{,}0267$; $c = 44$; $Q = 97$ cbm.
Gefälle 1:1500: $\sqrt{J} = 0{,}0258$; $c = 44{,}4$; $Q = 95$ cbm.
Gefälle 1:1600: $\sqrt{J} = 0{,}025$; $c = 44{,}4$; $Q = 92$ cbm.

Ermittlung des H. S. W. Die dem höchsten schiffbaren Wasserstand entsprechende Wasserführung des Flusses konnte im Entwurf III anders angenommen werden als im Entwurf I, da der gewählte Querschnitt eine viel größere Wassermenge abzuführen vermag. Werden die im Entwurf I ermittelten Wassermengen für H. S. W. und H. H. W. in Ermanglung genauerer Unterlagen als richtig angenommen, so kann man die dem neuen Querschnitt entsprechende Wasserführung für H. S. W. ermitteln. Für die Pegelstellen bei Wernshausen, Heimboldshausen und Wanfried liegen diese beiden Wassermengen fest. Bei Heimboldshausen beträgt hiernach die Wassermenge für H. S. W. des Entwurfes I 132 cbm und für H. H. W. 550 cbm. Der Wassermenge von 132 cbm entspricht im Querschnitt des Entwurfes III eine Wassertiefe von 3 m über Sohle. Wie aber aus dem Längenschnitt (Bl. 13) ersichtlich, ist der Querschnitt bei dieser Wassertiefe noch nicht bordvoll. Es kann und soll daher an dieser Stelle mit einem um 40 cm höheren H. S. W. gerechnet werden. Diesem Wasserstande entspricht eine Wassermenge von 174 cbm. In Text-Abb. 7 ist die neue H. S. W.-Linie eingetragen. Sie schneidet sich mit der H. H. W.- und der H. S. W.-Linie des Entwurfes I in dem gleichen Punkte der Nullinie.



Hiernach ergeben sich folgende Wassertiefen bei H. S. W. für die einzelnen Strecken:

Strecke Wernshausen — Barchfeld:

$$Q = 130 \text{ cbm}; \quad \frac{Q}{\sqrt{J}} = 4906 = F \cdot c \cdot \sqrt{R};$$

Wassertiefe $h = 2,9$ m.

Strecke Barchfeld — Heimboldshausen:

$Q = 174$ cbm; $h = 3,4$ m.

Strecke Heimboldshausen — Gerstungen:

$$Q = 193 \text{ cbm}; \quad \frac{Q}{\sqrt{J}} = 7480 = F \cdot c \cdot \sqrt{R}; \quad h = 3,6 \text{ m.}$$

Strecke Gerstungen — Hörschel:

$$Q = 212 \text{ cbm}; \quad \frac{Q}{\sqrt{J}} = 8480 = F \cdot c \cdot \sqrt{R}; \quad h = 3,8 \text{ m.}$$

Hieraus geht hervor, daß zwischen dem Wasserstand, bei dem die Schiffahrt ohne Anstauung des Wassers bereits möglich ist, und dem H. H. W. noch ein weiter Spielraum liegt. In dieser Zeit können die Schiffe bei geöffneten Toren fahren und haben nur an den wenigen Schleusen Aufenthalt (6 statt 20 in Entwurf I). Auch wird die Zeit, in der wegen Überschreitung des H. S. W. keine Schiffahrt stattfinden kann, erheblich eingeschränkt und wird voraussichtlich im Durchschnitt nur wenige Tage des Jahres betragen, zumal wenn durch die Anlage von Talsperren die höchsten Spitzen der Hochwässer später zurückgehalten werden.

Hochwasserabführung. Bei Entwurf III wird der bisherige Hochwasserabfluß erleichtert und verbessert, weil der Flußquerschnitt an sich eine viel größere Wassermenge abführt, ohne Überflutung des Tales, und die meisten vorhandenen Staustufen mit ihren festen Wehren und Mühlengerinnen fortfallen. Der Fall, daß eine Hochwasserwelle die Tore geschlossen vorfinden könnte, ist ausgeschlossen, weil schon bei der geringen Menge von 97 cbm sämtliche Tore geöffnet werden müssen.

Bei kleinerer Wasserführung der Werra werden zunächst die Umläufe für die Abführung des nicht für den Schiffahrtbetrieb benötigten Wassers sorgen. Sie leisten bei voller Öffnung und 40 cm Überdruck etwa 20 cbm/Sek. Bei größeren Wassermengen müssen die Tore soweit angehoben werden, daß das überschüssige Wasser unter ihnen durchfließen kann. Die Tore werden dann stets nur bis zu einer bestimmten Stellung gesenkt, was dadurch zu erreichen ist, daß ein Anschlag am Führungsgerüst den Motor und damit die Torbewegung im gegebenen Augenblick ausschaltet. Der Betriebsplan für die Bewegung der Tore wird später erörtert.

Abmessungen der Staustufen. Anzahl und Höhe der Staustufen sind abhängig von dem Gefälle der Talsohle, dem zu erwartenden Wasserzufluß und der zuzulassenden Fahrgeschwindigkeit der Schiffe. Soll ein Schiff in ununterbrochener Fahrt zu Berg fahren können, so muß in der Zeit, in welcher es eine Haltung durchfährt, eine ganze Füllung von oben zufließen. Die Fahrgeschwindigkeit kann mit Rücksicht auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebes nicht gut unter 4 km in der Stunde angenommen werden. Nun ist aber die Wasserführung der Werra in einem Teil des Jahres so gering, daß bei dieser Geschwindigkeit die Tore so nahe aneinander gelegt werden müßten, daß ein sicherer Betrieb nicht mehr möglich wäre und unverhältnismäßig hohe Kosten entständen. Deshalb ist der ganze Entwurf nur zu verwirklichen, wenn durch den Bau von Talsperren im oberen Werragebiet für die trockenen Monate ausreichendes Zuschußwasser geliefert werden kann. Der Fassungsraum dieser Talsperren muß so groß bemessen sein, daß in ihnen der gesamte, in der trockenen Zeit nötige Zuschuß aufgespeichert werden kann.

Talsperren. Nach der Denkschrift von Dr.=Ing. Wolf (Hannover 1910) können mit einem Kostenaufwand von 10 780 000 Mark in sieben Stauweihern 32 185 000 cbm angesammelt werden. Neuere Bearbeitungen des Vereins für Schiffbarmachung der Werra haben ergeben, daß in zwei Talsperren, im Haseltal bei Ellingshausen und im Schönautal oberhalb Schwarza je 23 000 000 cbm, also zusammen 46 000 000 cbm aufgespeichert werden können. Die Kosten sollen sich auf 12 500 000 Mark belaufen, das sind etwa 27 Pf. für 1 cbm. Nach Innecken-Leppla sind fünf Stauweiher mit einem Fassungsraum von 63 800 000 cbm möglich bei einem Kostenaufwand von 19 600 000 Mark, also etwa 0,30 Mark/cbm. Mit diesen rd. 60 000 000 cbm Zuschuß möge im folgenden zunächst gerechnet werden.

Bei niedrigem Sommerwasser führt die Werra bei Wernshausen im Mittel etwa 7 cbm/Sek. Nach den Unterlagen des Entwurfes I muß mit dieser Wasserführung, welche zeitweilig sogar bis auf 2 cbm herabsinkt, während einer Zeit von etwa vier Monaten gerechnet werden. Nimmt man weiter an, daß 15stündiger Schiffahrtbetrieb eingerichtet wird, so würde bei Aufspeicherung dieses Zuflußwassers während der Ruhezeit ein natürlicher Zufluß von $7 \cdot \frac{24}{15} = 11$ cbm/Sek. zur Verfügung stehen. Hierzu kommt das Zuschußwasser aus den Stauweihern mit $\frac{60\,000\,000}{4 \cdot 30 \cdot 15 \cdot 3600} = \sim 9$ cbm/Sek. Der Gesamtzufluß würde also 20 cbm/Sek. betragen.

Bei 40 cm Stauhöhe, also $0,4 \cdot 1400 = 560$ m Staulänge, ist der anzufüllende Inhalt $= \frac{32,8 + 35,2}{2} \cdot 0,4 \cdot 560 = 7616$ cbm, einschl. Verdunstungs- und anderer Verluste $= \sim 8000$ cbm, die Füllungszeit $= \frac{8000}{20} = 400$ Sek., demnach die Schiffsgeschwindigkeit $= \frac{0,56}{400} \cdot 60 \cdot 60 = \sim 5$ km/Std.

Ermäßigt man diese Geschwindigkeit unter Beibehaltung der Stauhöhe, so ergibt sich eine geringere Zuschußmenge. Bei 4,2 km/Std. Geschwindigkeit ist die Füllungszeit $= \frac{0,56}{4,2} \cdot 60 \cdot 60 = 480$ Sek. und der Zufluß $= \frac{8000}{480} = \sim 16$ cbm/Sek., demnach der erforderliche Zuschuß aus den Stauweihern $= 16 - 11 = 5$ cbm/Sek.

Vorläufig mit diesem geringeren Zuschuß zu rechnen dürfte angebracht sein, da es nicht wahrscheinlich ist, daß sämtliche möglichen Talsperren sofort gebaut werden. Dem Zuschuß von 5 cbm/Sek. entspricht ein Fassungsraum von $4 \cdot 30 \cdot 15 \cdot 3600 \cdot 5 = 32\,400\,000$ cbm, der nach den obigen Angaben mit ziemlicher Sicherheit zu erreichen ist. Stehen größere Wassermengen zur Verfügung, so kann die Fahrgeschwindigkeit oder die tägliche Betriebszeit erhöht werden.

Reichen in besonders trockenen Sommern die angegebenen Wassermengen nicht aus, namentlich, wenn die Wasserführung

unter 7 cbm/Sek. sinkt, so wird die tägliche Betriebszeit einige Wochen lang verkürzt. Z. B.:

Wasserführung	3	cbm/Sek.
Betriebszeit ermäßigt auf	9	Std./Tag
Natürlicher Zufluß $= \frac{3 \cdot 24}{9} =$	8	cbm/Sek.
Zuschuß aus den Talsperren $= \frac{5 \cdot 15}{9} =$	8,3	„
Zusammen	∾ 16,0	cbm/Sek.

Auf der im Entwurf III behandelten „oberen Strecke" ist die Höhe der Staustufen gleichbleibend mit 0,4 m angenommen und nur die Länge dem Gefälle entsprechend geändert, da die Wasserführung der unterhalb einmündenden Bäche aus den Unterlagen nicht zu ersehen ist. Sollte durch diese Bäche ein bestimmter Wasserzufluß gesichert sein, so könnte die Höhe der Staustufen, etwa unterhalb Vacha, vergrößert und die Torzahl ermäßigt werden. Auf der mittleren und unteren Strecke könnte die Stauhöhe auf 50 cm erhöht werden.

Ausgleichsweiher. Oberhalb Wernshausen ist ein Ausgleichsweiher, möglicherweise zugleich Sammelbecken anzulegen, der den Ablauf von 15 Std., also 16·15·3600 = 864 000 cbm aufnehmen kann. Das von Innecken-Leppla an dieser Stelle vorgeschlagene Sammelbecken faßt 8 000 000 cbm bei 3 600 000 Mark Kosten.

Betriebsplan. Nachstehender Betriebsplan (Text-Abb. 8) gibt von links nach rechts die Fahrzeiten, Fahrlängen und die Bewegungszeiten für die Tore an. Der Schleppzug, 160 m lang, hat Tor 1 gerade durchfahren (Anfangsstellung, Länge 0 für das Ruder des zweiten Schleppkahns). Nach 1 Min. wird Tor 1, 3, 5 abwärts bewegt, nach 3 Min. sind sie geschlossen. In demselben Augenblick wird Tor 2, 4, 6 angehoben, damit der Ausgleich der beiden Haltungen erfolgen kann. Theoretisch sind zum Ausgleich auf 4 cm nur $1^1/_2$ Min. erforderlich, wobei berücksichtigt ist, daß die Druckhöhe mit zunehmendem Ausgleich abnimmt. In Wirklichkeit wird aber der Ausgleich länger dauern, da das Zuströmen des Wassers aus der oberen Haltung und seine Verteilung auf die ganze Länge der unteren in den Formeln nicht berücksichtigt werden kann. Bestimmten Aufschluß hierüber können nur Versuche in der Wirklichkeit ergeben. Es ist aber anzunehmen, daß die 8 Min., welche voll für den Ausgleich zur Verfügung stehen, ausreichen werden. Nach 5 Min. ist die Hebung der Tore beendet. Der Schleppzug befindet sich mit der Spitze noch 50 m vor Tor 2. Nach 8 Min. hat der Schleppzug die Haltung 1 bis 2 durchfahren und befindet sich mit dem Ruder des zweiten Schiffes gerade hinter Tor 2.

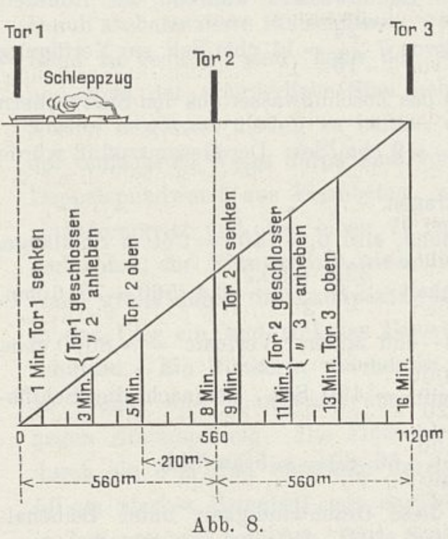


Abb. 8.

Bedienung der Tore. Um einen ständigen Berg- und Talbetrieb zu ermöglichen, ist es erforderlich, daß die Haltungen stets paarweise ausgeglichen sind, wie in Text-Abb. 9 dargestellt ist. Die Motoren der Tore müssen so miteinander verbunden sein, daß die Tore der geraden Nummern stets die gleiche Bewegung gemeinsam ausführen und ebenso die Tore der ungeraden Nummern. Während die eine Torgruppe angehoben wird, senkt sich die andere. Die Stromschaltung muß an jedem Tore auf beiden Ufern mittels eines besonderen Schalthebels bewirkt werden können. Auch muß es möglich sein, die Stromzuführung für die ganze Strecke an jedem Tore zu unterbrechen. Die Bewegung der Tore kann dann, weitere Prüfung und die Ergebnisse von Versuchen vorbehalten, in der Art erfolgen, daß ein Radfahrer die Schiffe begleitet. Dieser fährt dem Schleppzug voraus nach dem geöffneten Tor 1, schaltet die Stromzuführung aus und wartet, bis alle Schiffe unter dem Tor durchgefahren sind. Dann schaltet er den Strom ein, wodurch dieses Tor und alle anderen der gleichen Gruppe nieder-, die der anderen Gruppe in die Höhe gehen, und fährt an dem Schleppzug vorbei bis zu dem nunmehr geöffneten Tor 2. Der Ausgleich der Haltungen erfolgt während der Fahrt des Schleppzuges von 1 nach 2. Bei Tor 2 schaltet der Radfahrer zunächst wieder den Strom aus und wartet, bis das letzte Schiff unter dem Tor hindurchgefahren ist, um durch Einschaltung des Stromes das Herabgehen des Tores zu bewirken. Er hat also in der Folge nichts weiter zu tun, als die Tore hinter den Schleppzügen zu schließen. Die vorherige Ausschaltung des Stromes ist notwendig, damit nicht zur unrechten Zeit von dem Begleitmann eines anderen Schleppzuges, etwa eines zu Tal fahrenden, die Tore in Bewegung gesetzt werden. Für jede Teilstrecke zwischen zwei Schleusen müssen je nach der Länge mindestens zwei Radfahrer zur Verfügung stehen, einer für die Berg- und einer für die Talfahrt. Der mit den zu Berg fahrenden Schiffen an der oberen Schleuse angekommene Radfahrer übernimmt auf der Rückfahrt die Begleitung des nächsten zu Tal fahrenden Schleppzuges. Jeder Schleppzug — ein Schlepper, zwei Anhänger — muß durch einen Radfahrer begleitet werden. Größere Zuglängen, etwa mehrere Schleppzüge hintereinander, dürfen nicht gebildet werden, da dann die Durchfahrtzeit unter den Toren zu lang und die Zeit für den Ausgleich der Haltungen zu kurz wird. Ist eine Torstrecke sehr lang, wie z. B. die unterste Werrastrecke oberhalb Münden, so kann sie in zwei oder mehr Abschnitte zerlegt werden, deren Bedienung wie diejenige der selbständigen Schleusenstrecken erfolgt.

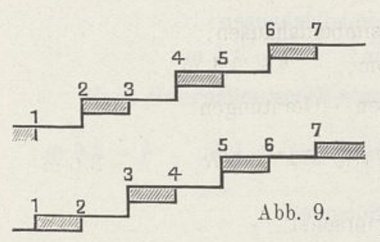


Abb. 9.

Schaltschema für die Torbewegung. Um zu zeigen, daß die vorstehend beschriebene Art der Torbewegung möglich ist, ist in Abb. 6 Bl. 14 ein Schaltschema beigefügt, welches wir ebenso wie die folgenden elektrotechnischen Ausführungen der freundlichen Mitarbeit des Herrn Regierungsbaumeisters Stieglitz-Cassel verdanken. Das Schaltschema wird zwar bei der genaueren Ausarbeitung noch Änderungen und Ergänzungen erfahren müssen. So sind der Einfachheit und Klarheit halber die Selbstanlasser vor den Motoren fort-

gelassen. Immerhin erhellt daraus, daß die scheinbar schwierigen Bedingungen, welche bei der Torbewegung zu erfüllen sind, durch einfache Handgriffe erledigt werden können.

Die Bedingungen für das Schaltschema sind folgende:

1. Die Motoren der Tore müssen so miteinander verbunden sein, daß die Tore der geraden Nummern stets die gleiche Bewegung gemeinsam ausführen und ebenso die Tore der ungeraden Nummern.

2. Einer Senkbewegung der Tore mit gerader Nummer soll gleichzeitig eine Hubbewegung der Tore mit ungerader Nummer entsprechen.

3. Die Bewegung der Tore soll an jedem Tore selbst eingeleitet werden können, und zwar so, daß das jeweils bediente Tor und alle anderen der gleichen Gruppe sich senken, während das Heben der anderen Torgruppe durch Schaltung zwangläufig erfolgt.

4. Es muß möglich sein, die Stromzuführung an jedem Tore für die ganze Strecke zu unterbrechen.

5. Die Unterbrechung der Stromzuführung und die Einleitung der Torbewegung soll von jedem Ufer aus erfolgen können.

In dem Schaltschema sind fünf Tore angenommen. Der Schleppzug fährt in Richtung I bis V und hat gerade Tor III verlassen. Der Begleitmann hat durch Heben des Schalthebels in Stellung 3 (Text-Abb. 10) den Strom eingeschaltet und die Senkung des Tores III eingeleitet. Die gleiche Bewegung macht Tor I und V, während Tor II und IV in die Höhe gehen. Der Betätigungsschalter ist doppelpolig mit drei Stellungen, Betriebs-, Ausschalt- und Senkstellung. Der Begleitmann wartet nun so lange, bis Tor III geschlossen oder durch Betätigung des Endausschalters angehalten ist. Dann bringt er den Schalter über Stellung 2 in die Betriebsstellung 1, überholt seinen Schleppzug und fährt ihm voraus nach Tor IV, welches er geöffnet vorfindet. Hier stellt er den Hebel von 1 auf 2, wodurch der Strom ausgeschaltet wird, wartet, bis der Schleppzug das Tor durchfahren hat und wiederholt dann

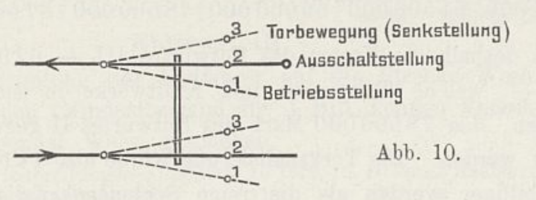


Abb. 10.

die oben beschriebenen Handgriffe. Senkt sich das Tor, wenn der Hebel auf 3 gestellt ist, nicht, so befindet sich an einer anderen Stelle der Torstrecke noch ein Schleppzug unter dem betreffenden Tore. Die Senkbewegung tritt erst ein, wenn auch dort auf Stellung 3 geschaltet ist.

In der Endstellung des Tores muß der Motor abgestellt werden. Dies geschieht durch Endschalter, welche selbsttätig den Umschalter durch Anheben des Gegenarmes von der Senkstellung in die Ausschaltstellung zurückführen. Hierdurch wird erreicht, daß die nicht betätigten Schalter der Tore I, II, IV und V von dem Endschalter nicht berührt und daher nicht beeinflußt werden. Dies ist notwendig, weil sonst der Stromlauf für die nächste Torbewegung von anderen Stellen aus gestört würde. Die Endschalter werden verstellbar an den Toren angebracht und für die augenblickliche Wasserführung eingestellt. Für gewöhnlich gehen sie an den fest auf den Torgerüsten sitzenden Schaltern und deren Gegenhebel (Endschalterbetätigung) vorbei. Nur an dem gerade bedienten Tor wird durch die Stellung des Schalters auf 3 der ganze Schalter so weit seitlich gerückt, daß er in die Ebene des Endschalters kommt und von diesem betätigt werden kann. Beim Umschalten in die Betriebsstellung rückt der Schalter wieder in seine frühere Lage.

Die Betriebsstellung gestattet infolge Kurzschluß den durchlaufenden Stromfluß, der durch geeignete Widerstände (*W*), den Motorenwiderständen entsprechend, eingeschränkt werden muß.

An durchlaufenden Hauptleitungen sind vier erforderlich. Hierzu kommen unter Umständen noch besondere Hilfs-Signalleitungen. Wegen der Serienschaltung wird verhältnismäßig hohe Betriebsspannung (etwa 1000 Volt) erforderlich werden.

Die Bedingung 5 ist auf dem Schaltschema nicht besonders dargestellt. Sie kann dadurch erfüllt werden, daß auf jeder Uferseite ein Schalter, wie oben beschrieben, angebracht wird. Die Schaltung an jedem Tor wird dann so sein wie in Text-Abb. 11.

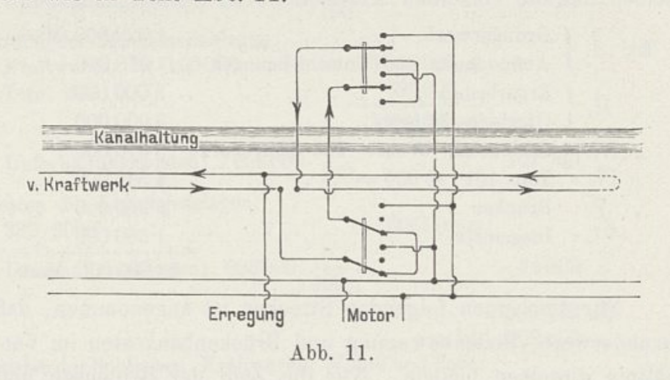


Abb. 11.

Wenn die eine Torgruppe zum Durchlassen des überschüssigen Wassers nicht ganz geschlossen wird, so wird die andere Gruppe um dasselbe Maß weniger gehoben. Trotzdem muß unter dem angehobenen Tor stets die erforderliche Höhe von 4 m über dem Spiegel der ausgeglichenen Haltung sein. Die Torgerüste sind dementsprechend höher zu bauen.

In dem Betriebsplan war angenommen, daß die Tore der einen Gruppe erst in die Höhe gehen sollten, wenn die Tore der anderen Gruppe bereits geschlossen sind, um zu beweisen, daß ausreichend Zeit für diese Bewegung zur Verfügung steht. Es kann aber vielleicht damit gerechnet werden, daß auch die gleichzeitige Bewegung sämtlicher Tore Wasserverluste nicht zur Folge hat. Bei der Länge der Haltungen wird die Ausgleichswelle möglicherweise erst an dem nächsten Tore ankommen, wenn dieses bereits geschlossen ist. Versuche werden in dieser Hinsicht noch die erforderliche Klärung geben können. Die Tore sind mit Signalen, ähnlich denen der Eisenbahn (bei Nacht Lichter), derart zu verbinden, daß jederzeit ersichtlich ist, ob sie geschlossen oder geöffnet sind.

Die Einstellung der an den Toren angebrachten Endschalter erfolgt derart, daß zunächst durch Versuche festgestellt wird, bis zu welcher Lage die Tore bei den verschiedenen Wasserführungen (Pegelständen) herabgelassen werden dürfen, damit der erforderliche Stau von 40 bzw. 50 cm gehalten werden kann. Die diesen Torstellungen (Wassermengen, Pegelständen) entsprechenden Stellungen der Endschalter werden gleichfalls ein für allemal festgelegt, so daß bei einem bestimmten Pegelstand die Endschalter einer

Torstrecke von den Streckenradfahrern gleichmäßig eingestellt werden können.

Für die immerhin selten vorkommende Einzelbewegung der Tore dient vorläufig ein Handantrieb, welcher nach Auskupplung des Motors auf die Vorgelegwelle wirkt. Wenn die Wasserführung in der Werra so groß ist, daß ohne Stau die erforderliche Schiffahrtstiefe vorhanden ist, müssen sämtliche unten befindlichen Tore auf diese Weise angehoben werden. Auch kann die Einzelbewegung für Instandsetzungsarbeiten erforderlich sein. Gegebenenfalls könnte erwogen werden, auch diese Bewegung durch elektrischen Strom zu bewirken.

Anlagekosten. Die Kosten für die obere Strecke von Wernshausen bis Hörschel sind einschließlich Abfindung und Entschädigung der Mühlenbesitzer und einschließlich Anlage der Kraftwerke an den Schleusen zu 23 000 000 Mark ermittelt, das sind rd. 324 000 Mark/km (bei Entwurf II 357 000 Mark/km). Die Kosten verteilen sich folgendermaßen auf die einzelnen Arbeiten:

Tit. I.	Grunderwerb	1 322 000	Mark
	Abfindungen und Entschädigungen	1 978 000	„
„ II.	Erdarbeiten	6 000 000	„
	Uferbefestigungen	3 000 000	„
„ III.	Schleusen, Wehre und Kraftwerke	3 575 000	„
„ IV.	Tore 101 · 45 000 =	4 545 000	„
„ V.	Brücken	1 200 000	„
„ VI.	Insgemein	1 380 000	„
		23 000 000	Mark.

Für die beiden folgenden Strecken ist angenommen, daß Grunderwerb, Bodenbewegung und Brückenbaukosten im Verhältnis dieselben bleiben. Nur die Zahl der Schleusen und Tore ist verschieden und die Entschädigung für die Mühlenbesitzer. Auf der unteren Strecke sind z. B. nur 6,8 m Mühlengefälle zu beseitigen gegen 17 m auf der oberen Strecke, und Entschädigung für Wasserentziehung ist überhaupt nicht zu zahlen.

Mittlere Strecke:

Tit. I.	Grunderwerb	851 865	Mark
	Abfindungen und Entschädigungen	468 135	„
„ II.	Erdarbeiten	3 865 875	„
	Uferbefestigungen	1 934 125	„
„ III.	Schleusen, Wehre und Kraftwerke	1 400 000	„
„ IV.	Tore 54 · 45 000 =	2 430 000	„
„ V.	Brücken	780 000	„
„ VI.	Insgemein	770 000	„
		12 500 000	Mark.

Untere Strecke:

Tit. I.	Grunderwerb	1 173 060	Mark
	Abfindungen und Entschädigungen	756 940	„
„ II.	Erdarbeiten	5 323 500	„
	Uferbefestigungen	2 676 500	„
„ III.	Schleusen, Wehre und Kraftwerke	1 555 000	„
„ IV.	Tore 77 · 45 000 =	3 465 000	„
„ V.	Brücken	1 071 000	„
„ VI.	Insgemein	979 000	„
		17 000 000	Mark.

Für den 6 km langen Stichkanal nach Eisenach sind dieselben Kosten eingesetzt wie für Entwurf II, da des sehr steilen Gefälles wegen (etwa 1 : 500) die Torkanalisierung hier nicht durchführbar ist, also 5 000 000 Mark.

Die Gesamtkosten für Entwurf III betragen demnach 57 500 000 Mark. Hierzu kommen noch die Kosten der Talsperren mit rd. 9 500 000 Mark, so daß die Schiffbarmachung der ganzen Strecke von Münden bis Wernshausen einschließlich Anlage der Kraftwerke die Summe von 67 000 000 Mark erfordert gegenüber 69 000 000 Mark des Entwurfes II ohne Talsperren und Kraftwerke. Durch die beiden letztgenannten Anlagen würden sich die Kosten für Entwurf II noch um 16 500 000 Mark erhöhen, durch den Bau der Talsperren allein um 9 500 000 Mark.

Die technische Durchführbarkeit der reinen Schleusenkanalisierung hängt nicht unbedingt von der Anlage von Talsperren und Kraftwerken ab. Auch die geringste Wasserführung in der Werra — 2 cbm/Sek. — reicht noch aus, um außer Deckung der Verluste für Verdunstung und Versickerung das Schleusungswasser für einen Jahresverkehr von etwa 4 000 000 t sicherzustellen. Es ist aber klar, daß die Entziehung einer derartigen Wassermenge den Mühlenanlagen empfindlichen Schaden bringen und sie zeitweise gänzlich still legen würde. Auch die Landwirte dürften Einspruch erheben, wenn für die Bewässerung ihrer Ländereien gerade in der trockenen Jahreszeit kein oder nur ungenügendes Wasser aus Rücksicht auf die Schiffahrt abgegeben würde. Die Erbauung von Talsperren erscheint also auch für die reine Schleusenkanalisierung im allgemein wirtschaftlichen Interesse geboten, um so mehr, als sie gleichzeitig einen wirksamen Schutz gegen die gefährlichen Hochwasser im Werratal bieten, deren Abfluß durch Einbau der vielen Staustufen nicht erleichtert werden dürfte. Der Ausbau der Kraftwerke kommt erst in zweiter Linie in Frage, würde aber bei der ungleichen Wasserführung der Werra und der erheblichen Wasserabgabe an die Schiffahrt ohne Anlage von Talsperren gleichfalls wirtschaftlich schwer zu verwirklichen sein.

In dem Ergebnis des Kostenvergleiches der drei Entwürfe:

Entwurf I		Entwurf II		Entwurf III
ohne Talsperren	mit Talsperren	ohne Talsperren	mit Talsperren	
42 000 000	51 500 000	69 000 000	78 500 000	67 000 000

müssen deshalb die Kosten des Entwurfes III — 67 000 000 Mark —, welche Talsperren und Kraftwerke in sich einschließen, den 78 500 000 Mark des Entwurfes II gegenübergestellt werden. Die Torkanalisierung würde also 11 500 000 Mark billiger werden als die reine Schleusenkanalisierung, wobei unberücksichtigt bleiben möge, daß bei der Torkanalisierung die Anlage von 10 Kraftwerken — 1 950 000 Mark — mitveranschlagt ist, durch welche elektrischer Strom für die Bewegung der Tore und Schleusen und darüber hinaus auch für andere Zwecke erzeugt werden kann.

Kosten der Unterhaltung und des Betriebes.

Die allgemeinen Verwaltungskosten, welche aus der Einrichtung der erforderlichen Aufsichts- und Verwaltungsbehörden erwachsen, werden für beide Kanalisierungsarten ungefähr dieselben sein. Die Kosten des eigentlichen Betriebes, wie die Beaufsichtigung und Bedienung der Bauwerke, und diejenigen der Unterhaltung sind verschieden.

Man kann annehmen, daß für jede Schleuse mit Wehranlage ein Schleusenmeister und zwei Bedienungsleute und, wenn ein Kraftwerk vorhanden ist, noch ein Maschinist erforderlich sind. Die Bedienung der Torstrecken erfolgt durch

Radfahrer. Wird jedem dieser Radfahrer eine Strecke von etwa 10 km zugewiesen, so kann er den Hin- und Rückweg (je 2 Std.) zweimal am Tage machen und hierbei zwei Schleppzüge zu Berg und zwei zu Tal begleiten. Nimmt man, wie üblich, an, daß die Hinfahrt mit voller, die Rückfahrt mit $^1/_5$ Fracht erfolgt, so kann 1 Radfahrer täglich $480 \cdot 2 \cdot 2 = 1920$ t und an 270 Betriebstagen $1920 \cdot 270 = 518400$ t im Jahr befördern. Bei 2 Radfahrern (Mindestbestand) steigert sich diese Leistung auf rd. 1000000 t.

Im folgenden sollen die Betriebs- und Unterhaltungskosten der ganzen Strecke Wernshausen-Münden einschließlich des Stichkanals nach Eisenach nach beiden Kanalisierungsarten (Entwurf II und III) für einen Verkehr von 1, 2, 3 und 4 Mill. Tonnen gegenübergestellt werden:

Entwurf II.

1. Unterhaltung der Strecke, 180 km Hauptkanal, 6 km Stichkanal, je 1500 ℳ = 186 · 1500 . . . . . . 279 000 ℳ
2. Unterhaltung der Bauwerke, 0,4 vH. der festen Teile und 1 vH. der beweglichen Eisenkonstruktionen (bewegliche Wehrteile).
   Für die obere, 71 km lange Strecke beträgt Tit. III u. IV des Kostenüberschlages (Schleusen, Wehre und Brücken, S. 123) 9371000 + 1280000 = 10651000 ℳ oder 150000 ℳ/km. Die beweglichen Teile der 49 Wehre sind zu je 40000 ℳ zu veranschlagen. Daher Kosten von Tit. III u. IV für die ganze 180 km lange Strecke:
   180 · 150000 — 45 · 40000 + 2 340 000 (Stichkanal) = 27 540 000 ℳ
   für die festen und
   45 · 40 000 + 160 000 (Stichkanal) = 1 960 000 ℳ
   für die beweglichen Teile.
   Unterhaltungskosten: $27\,540\,000 \cdot \frac{0,4}{100}$ . . . . 110 160 „
   „ $1\,960\,000 \cdot \frac{1}{100}$ . . . . 19 600 „
3. Betrieb der Schleusen und Wehre:
   49 Schleusenmeister, Gehalt 1400 bis 2000, im Mittel 1700 ℳ = 49 · 1700 . . . . 83 300 „
   49 · 2 = 98 Bedienungsleute = 98 · 1200 . . . . . 117 600 „
4. Unterhaltung und Betrieb der Baggergeräte und Dampfschiffe . . . . 100 000 „

Im ganzen: 709 660 ℳ
= rd. 709 700 ℳ.

Entwurf III.

Die Verteilung der Radfahrer auf die Strecke Wernshausen-Münden (Mindestbestand für 1 Mill. Tonnen Verkehr) kann in folgender Weise geschehen:

Torstr. 1,	Herrenbreitungen-Allendorf,	15 Tore,	rd. 10 km,	2	Radfahrer,
„ 2,	Allendorf-Tiefenort,	11 „	„ 8 „	2	„
„ 3,	Tiefenort-Vacha,	16 „	„ 11 „	2	„
„ 4,	Vacha-Lengers,	14 „	„ 9 „	2	„
„ 5,	Lengers-Berka,	16 „	„ 11 „	2	„
„ 6,	Berka-Hörschel,	29 „	„ 20 „	4	„
„ 7,	Hörschel-Treffurt,	38 „	„ 30 „	6	„
„ 8,	Treffurt-Wanfried,	15 „	„ 14 „	3	„
„ 9,	Wanfried-Albungen	21 „	„ 17 „	3	„
„ 10,	Albungen-Unterrieden	30 „	„ 25 „	5	„
„ 11,	Unterrieden-Münden,	27 „	„ 20 „	4	„
		232 Tore,		35	Radfahrer.

a) Verkehr 1 Mill. Tonnen im Jahr:
1. Unterhaltung der Strecke, wie bei Entwurf II. . 279 000 ℳ
2. Unterhaltung der Bauwerke:
   0,4 vH. der festen Teile.
   1 vH. der beweglichen Eisenkonstruktionen.
   6 vH. der Maschinenanlagen (einschl. Erneuerung).
   5 vH. der Leitungsanlagen (einschl. Erneuerung).
   Die beweglichen Teile der Wehre sind zu je 40000 ℳ, die Maschinenanlagen der Kraftwerke zu je 100 000 ℳ, diejenigen der Tore zu je 3000 ℳ, die Eisenkonstruktionen der Tore zu je 8000 ℳ und die Leitungsanlagen zu 3000 ℳ für jedes Tor zu veranschlagen.

   Kosten der festen Teile:
   Obere Strecke:
   Tit. III: 3575000 — 6 (120000 + 40000) 2615000 ℳ
   Tit. IV: 101 · 31000 . . . . 3131000 „
   Tit. V . . . . 1200000 „
   Mittlere Strecke:
   Tit. III: 1400000 — 320000 . . . . 1080000 „
   Tit. IV: 54 · 31000 . . . . 1674000 „
   Tit. V . . . . 780000 „
   Untere Strecke:
   Tit. III: 1555000 — 320000 . . . . 1235000 „
   Tit. IV: 77 · 31000 . . . . 2387000 „
   Tit. V . . . . 1071000 „
   15173000 ℳ
   Stichkanal: 2340000 „
   17513000 ℳ
   Unterhaltungskosten: $17513000 \cdot \frac{0,4}{100}$ . . . . 70 052 ℳ

   Kosten der beweglichen Eisenkonstruktionen:
   Wehre: 10 · 40000 . . . . . . 400000 ℳ
   Tore: 232 · 8000 . . . . 1856000 „
   Stichkanal: 160000 „
   2416000 ℳ
   Unterhaltungskosten: $2416000 \cdot \frac{1}{100}$ . . . . 24 160 „

   Kosten der Maschinenanlagen:
   Kraftwerke: 10 · 100000 . . . . 1000000 ℳ
   Tore: 232 · 3000 . . . . 696000 „
   1696000 ℳ
   Unterhaltungskosten: $1696000 \cdot \frac{6}{100}$ . . . . 101 760 „

   Kosten der Leitungsanlagen:
   232 · 3000 . . . . 696000 ℳ
   Unterhaltungskosten: $696000 \cdot \frac{5}{100}$ . . . . . 34 800 „
   509 772 ℳ
   = rd. 509 800 „
3. Betrieb der Schleusen, Kraftwerke, Wehre und Tore:
   14 Schleusenmeister: 14 · 1700 . . . . 23 800 „
   10 Maschinisten: 10 · 1700 . . . . 17 000 „
   14 · 2 = 28 Bedienungsleute und 35 Radfahrer, zusammen 63 · 1200 . . . . 75 600 „
4. Unterhaltung und Betrieb der Baggergeräte und Dampfschiffe . . . . 100 000 „
   726 200 ℳ

b) Verkehr 2 Mill. Tonnen im Jahr:
   Es erhöhen sich nur die unter a) 3. eingesetzten Betriebskosten um 35 · 1200 = 42 000 ℳ. Also Gesamtunterhaltungskosten . . . . 768 200 „
c) Verkehr 3 Mill. Tonnen im Jahr:
   Gesamtunterhaltungskosten . . . . 810 200 „
d) Verkehr 4 Mill. Tonnen im Jahr:
   Gesamtunterhaltungskosten . . . . 852 200 „

Verzinsung und Tilgung der Anlagekosten.

Im folgenden soll der für die Schleusenkanalisierung günstige Fall angenommen werden, daß dort keine Talsperren erbaut werden, während diese bei dem Torkanal unter allen Umständen erforderlich sind, dann allerdings auch Einnahmen aus Wasserkraft liefern. Ohne Berücksichtigung dieser Einnahmen ergibt sich dann folgende Zusammenstellung:

Entwurf II.
Verzinsung und Tilgung des Anlagekapitals
69000000 zu $4^1/_2$ vH. . . . . . . 3105000 Mark

Entwurf III.
Verzinsung und Tilgung des Anlagekapitals
67000000 zu $4^1/_2$ vH. . . . . . 3015000 „

Einnahmen (außer Schiffahrtabgaben). Außer den Schiffahrtabgaben sind besondere Einnahmen nur bei der Torkanalisierung aus der Anlage der Talsperren zu erwarten.

Zusammenstellung I.

Monat	Zufluß cbm/Sek.	Monatl. Zufluß cbm	Monatl. Abfluß cbm	Inhalt d. Beckens am Ende d. Monats cbm	Mittl. Nutzgefälle m	Verfügbare Gesamtleistung in K.W.-Std	Leistung bei Ausbau auf 1200 PS in K.W -Std.
Januar	2,40	6 428 000	7 000 000	6 182 000	19,7	255 000	240 000
Februar	2,24	5 806 000	7 000 000	4 988 000	18,3	240 000	240 000
März	3,98	10 657 000	8 000 000	7 645 000	19,4	287 000	240 000
April	5,36	13 893 000	9 000 000	12 538 000	24,4	400 000	240 000
Mai	3,62	9 696 000	8 000 000	14 234 000	28,3	420 000	240 000
Juni	1,83	4 743 000	4 977 000	14 000 000	29,6	273 000	240 000
Juli	0,79	2 116 000	5 500 000	10 616 000	27,6	280 000	240 000
August	0,69	1 848 000	5 500 000	6 964 000	22,8	232 000	232 000
September	1,02	2 644 000	5 500 000	4 108 000	18,1	184 000	184 000
Oktober	1,43	3 830 000	5 500 000	2 438 000	13,9	140 000	140 000
November	1,70	4 406 000	4 500 000	2 344 000	11,8	98 000	98 000
Dezember	3.70	9 910 000	5 500 000	6 754 000	16.6	170 000	170 000
		75 977 000	75 977 000		20,9	2 979 000	2 504 000

Da diese Talsperren in erster Linie der Erhöhung des Niedrigwassers in den vier trockenen Monaten Juli bis Oktober dienen sollen und der Kosten wegen so knapp bemessen werden müssen, daß sie am Ende dieser Zeit bis auf einen geringen eisernen Bestand entleert sein werden, so kann zunächst an eine volle Ausnutzung der verfügbaren Wasserkräfte nicht gedacht werden. Um aber zu zeigen, daß immerhin eine beschränkte Ausnutzung möglich ist und hieraus nicht unerhebliche Einnahmen erzielt werden können, sollen im folgenden die beiden Talsperren im Haselgebiet auf die Möglichkeit der Gewinnung von Wasserkraft untersucht werden. Die Angaben stützen sich auf die Untersuchungen von Dr.-Ing. Wolf, Innecken und Leppla, die sich im wesentlichen decken.

Die Talsperre bei Schwarza schließt die Täler der Schönau und Christes an ihrer Vereinigungsstelle ab. Das Niederschlagsgebiet umfaßt 150 qkm. Die größte Stauhöhe beträgt 30 m, der Inhalt des gefüllten Beckens 15 000 000 cbm. Die Kosten sind auf 4 000 000 Mark veranschlagt. Das Kraftwerk wird zweckmäßig für 1200 PS Höchstleistung ausgebaut und kann im Monat bei 10-stündigem täglichem Betriebe 240 000 K.W.-Stunden leisten. Das weitere ist aus Zusammenstellung I ersichtlich.

Die durchschnittliche Gesamtleistung im Jahre beträgt demnach 2 500 000 K.W.-Stunden.

Die Talsperre bei Ellingshausen im Haseltal wird aus einem Niederschlagsgebiet von 328 qkm gespeist und nimmt das aus der Sperre bei Schwarza abfließende Wasser auf. Die größte Stauhöhe beträgt 17 m, das Becken faßt bei voller Füllung 23 000 000 cbm. Die Kosten ohne Kraftwerk sind gleichfalls auf 4 000 000 Mark veranschlagt. Das Kraftwerk soll auf 1500 PS ausgebaut werden und leistet im Höchstfalle monatlich 300 000 KW-Stunden. Das einzelne ergibt sich aus Zusammenstellung II.

Die größte durchschnittliche Gesamtleistung im Jahre beträgt rd. 3 100 000 K.W.-Stunden.

Rechnet man als Reingewinn, abzüglich der Verzinsung und Tilgung des Anlagekapitals und der Abschreibung, nur 1 Pf. für die abgegebene K.W.-Stunde — Betrag, der von den Einnahmen der Edertalsperre dem Ems-Weser-Kanal zugeführt werden soll —, so ergibt sich für beide Sperren eine Rein-Einnahme von 56 000 Mark.

Der Zuschuß zur Erhöhung des Niedrigwassers in der Werra während der vier trockenen Monate beträgt (vgl. die Tabellen) aus der Schönausperre $4 \cdot 5500000 - (2116000 + 1848000 + 2644000 + 3830000) = 11562000$ cbm und aus der Haselsperre $4 \cdot 13500000 - (2491000 + 2140000 + 3162000 + 4580000) = 19677000$ cbm, zusammen also 31 239 000 cbm oder in 1 Sek. 3 cbm. Bei

Zusammenstellung II.

Monat	Zufluß ohne Schönausperre cbm/Sek.	Monatlicher Zufluß ohne Schönausperre cbm	Monatlicher Zufluß aus der Schönausperre cbm	Gesamtzufluß cbm	Abfluß cbm	Inhalt des Beckens am Ende des Monats cbm	Mittleres Nutzgefälle m	Verfügbare Gesamtleistung in K.W.-Std.	Leistung bei Ausbau auf 1500 PS in K.W.-Std.
Januar	2,85	7 603 000	7 000 000	14 603 000	14 000 000	7 997 000	9,9	257 000	257 000
Februar	2,66	6 895 000	7 000 000	13 895 000	14 000 000	7 892 000	10,0	260 000	260 000
März	4,72	12 642 000	8 000 000	20 642 000	16 000 000	12 534 000	11,2	332 000	300 000
April	6,35	16 459 000	9 000 000	25 459 000	18 000 000	19 993 000	14,2	473 000	300 000
Mai	4,30	11 517 000	8 000 000	19 517 000	17 000 000	22 510 000	16,3	513 000	300 000
Juni	2,17	5 625 000	4 979 000	10 604 000	10 114 000	23 000 000	16,9	317 000	300 000
Juli	0,93	2 491 000	5 500 000	7 991 000	13 500 000	17 491 000	15,9	400 000	300 000
August	0,81	2 140 000	5 500 000	7 640 000	13 500 000	11 631 000	13,5	337 000	300 000
September	1,22	3 162 000	5 500 000	8 662 000	13 500 000	6 793 000	10,7	268 000	268 000
Oktober	1,71	4 580 000	5 500 000	10 080 000	13 500 000	3 373 000	7,9	200 000	200 000
November	2,02	5 236 000	4 500 000	9 736 000	9 000 000	4 109 000	6,9	115 000	115 000
Dezember	4,40	11 785 000	5 500 000	17 285 000	14 000 000	7 394 000	8.5	220 000	220 000
				166 114 000	166 114 000		11,8	3 692 000	3 120 000

15stündigem Schiffahrtbetrieb entspricht dies einem Zuschuß von rd. 5 cbm/Sek., genügt also, wie oben nachgewiesen wurde, den gestellten Forderungen. Besondere Rücksicht auf einen Hochwasserschutzraum brauchte bei Bestimmung der monatlichen Beckenfüllungen nicht genommen zu werden, weil in den Zahlen für die monatlichen Zuflüsse etwaige Hochfluten bereits enthalten sind. Der Ausgleich für das ungleichmäßig abgelassene Triebwasser erfolgt durch Ausgleichweiher, für welche ein Betrag von 1500000 Mark vorgesehen ist.

Gegenüberstellung der jährlichen Ausgaben. Nunmehr läßt sich eine Gegenüberstellung der jährlichen Ausgaben unter Berücksichtigung der Zins- und Tilgungsbeträge sowie der Einnahmen aus Wasserkraft machen:

Jährliche Ausgaben.

	Entwurf II	Entwurf III			
	Fast unabhängig von der Verkehrsgröße	Jahresverkehr			
		1000000 t	2000000 t	3000000 t	4000000 t
	ℳ	ℳ	ℳ	ℳ	ℳ
Betriebs- und Unterhaltungskosten . . .	709700	726200	768200	810200	852200
$4^1/_2$ vH. Zinsen und Tilgung	3105000	3015000	3015000	3015000	3015200
Zusammen:	3814700	3741200	3783200	3825200	3867000
ab Einnahmen aus Kraftwerken	—	56000	56000	56000	56000
Insgesamt:	3814700	3685200	3727200	3769200	3811200

Hiernach betragen nicht nur die Anlagekosten der Torkanalisierung weniger als die der Schleusenkanalisierung, sondern auch die jährlichen Ausgaben, und zwar sind sie anfangs, wenn der Verkehr gering ist, ebenfalls verhältnismäßig niedrig und steigen erst allmählich mit wachsenden Gütermengen annähernd auf den gleichen Betrag wie bei der Schleusenkanalisierung. Auch bei den ungünstigen Verhältnissen der Werra werden also unter allen Umständen die im folgenden nochmals im einzelnen nachzuweisenden großen Vorteile für den Schiffahrtverkehr und die Landeskultur ohne Steigerung der Ausgaben erreicht.

Schiffahrtkosten und Fracht. Um die drei Entwürfe auch in bezug auf die Wirtschaftlichkeit vergleichen zu können, sollen im folgenden zunächst die reinen Schiffahrtkosten (Streckenkosten) auf der Teilstrecke Münden — Wernshausen für die Entwürfe I, II und III vergleichsweise festgestellt und sodann für die beiden hauptsächlich in Betracht kommenden Verkehrswege Herne — Wernshausen und Wernshausen — Bremerhaven die gesamten Frachtkosten des Wasserweges für die Entwürfe I, II und III ermittelt und den entsprechenden Eisenbahnfrachten gegenübergestellt werden. Dabei sollen für den Weg Herne — Wernshausen zwei Fälle untersucht werden, erstens, wenn die Schiffsladung in Herne dem zu erwartenden Weserwasserstand angepaßt wird, und zweitens, wenn mit voller 600 t-Ladung[1]) bis Minden gefahren und dort entsprechend dem Weserwasserstand geleichtert wird.

Als Normalschiff wird das 600 t-Schiff mit 9 m Breite und 1,50 m Tiefgang[1]) und derjenige Wasserstand in der Weser in die Rechnung eingeführt, wie er sich nach Erbauung der Talsperren an der Eder und Diemel voraussichtlich einstellen wird. Das 1,75 m tief gehende 600 t-Schiff von 8 m Breite würde ungünstigere Ergebnisse haben.

1) Leer 0,30 m, $^1/_4$ beladen 0,60 m, $^1/_2$ beladen 0,90 m, $^3/_4$ beladen 1,20 m, voll beladen 1,50 m Tiefgang.

Weiter wird vorausgesetzt, daß die Beförderung in Schleppzügen mit zwei Anhängern erfolgt und daß Tag- und Nachtbetrieb stattfindet bei 270 Betriebstagen im Jahr. Es soll durchweg mit einer Fahrgeschwindigkeit von 5 km/Std. gerechnet werden.

Der Aufenthalt an den Schleusen wird für die Berechnung der reinen Schiffahrtkosten in Kilometer umgerechnet, und zwar für die Schleusen des Entwurfes I zu 8 km, für die Schleppzugschleusen zu 3,5 km und die Schachtschleusen zu 6 km. Für die Abgabenberechnung sind die wirklichen Entfernungen maßgebend.

Als Güter kommen für den Weg Herne — Wernshausen die Kohle und für den Weg Wernshausen — Bremerhaven das Kali fast ausschließlich in Frage, also beides Güter der niedrigsten Tarifklasse der westlichen Wasserstraße. Diese unterliegen auf dem Ems-Weser-Kanal von Herne bis Münden einer Abgabe von 0,5 Pf.[2])/tkm, auf der Weser einer solchen von 0,02 Pf./tkm, und zwar von Bremen bis zur Allermündung voll, von da bis Hameln zu 85 vH. und von hier bis Münden zu 70 vH. Für die kanalisierte Werra wird die gleiche Abgabe wie auf dem Ems-Weser-Kanal, also 0,5 Pf./tkm angenommen.

Der Berechnung der Schiffahrtkosten sind die bekannten Sympherschen Formeln zugrunde gelegt. Maßgebend für diese Kosten sind die Wasserverhältnisse auf der Weser von Hameln bis Münden nach Erbauung der Talsperren. Hiernach berechnen sich die Schiffahrtkosten folgendermaßen:

2 Vierteljahre mit $^3/_4$ Ladung = 4 Teile zu $\frac{140}{n} + 0{,}63 = \frac{560}{n} + 2{,}52$

1 Vierteljahr „ $^3/_4$ „ = 3 „ „ $\frac{100}{n} + 0{,}42 = \frac{300}{n} + 1{,}26$

1 „ „ $^4/_4$ „ = 4 „ „ $\frac{90}{n} + 0{,}30 = \frac{360}{n} + 1{,}20$

zus.: 11 Teile $= \frac{1220}{n} + 4{,}98.$

1 Teil = rd. $\frac{110}{n} + 0{,}45$ Pf./tkm.

Aus dieser Zusammenstellung geht ferner hervor, daß ein 600 t-Schiff der bezeichneten Art mit Rücksicht auf die Wasserstände in der Weser unterhalb Münden durchschnittlich jährlich mit

$$\frac{2 \cdot 300 + 1 \cdot 450 + 1 \cdot 600}{4} = \text{rd. } 400 \text{ t}$$

beladen werden kann. Im Durchschnitt von Hin- und Rückfahrt kann daher mit einer wirklichen Beladung eines Schiffes von $\frac{400 + 80}{2} = 240$ t gerechnet werden.

A. Reine Schiffahrtkosten (Streckenkosten) auf der Teilstrecke Münden — Wernshausen.

Hierfür kommen nur die im zweiten Teil der obigen Formel angegebenen Streckenkosten in Frage, da es sich um durchgehende Güter handelt, bei welchen Liegekosten (für

2) Auf dem Rhein-Weser-Kanal soll Kali nur die Hälfte der Abgaben der niedrigsten Tarifklasse V bezahlen, weil andernfalls der Wasserweg kaum in Betracht kommen würde. Ein gleiches Vorgehen auf der Werra und Weser ist kein wirtschaftliches Erfordernis und würde die Ertragsfähigkeit und Berechtigung der Werrakanalisierung wesentlich beeinträchtigen.

die Zeit des Ladens und Löschens) auf der Strecke Münden — Wernshausen nicht in Rechnung zu stellen sind.

Länge nach Entwurf III . . .	180 km	
Zuschlag für 10 Schleusen je 3,5 km	35 „	
zusammen	215	Betriebskilometer.
Länge nach Entwurf II	181 km	
45 Schleusen je 3,5 km (ohne die in Münden)	157,5 „	
zusammen	339	Betriebskilometer.
Länge nach Entwurf I	181 km	
45 Schleusen je 8 km	360 „	
zusammen	541	Betriebskilometer.

Schiffahrtkosten nach Entw. III 215 · 0,45 = 97 Pf. = 0,97 ℳ/t
(Streckenkosten) „ „ II 339 · 0,45 = 153 „ = 1,53 „
„ „ „ I 541 · 0,45 = 243 „ = 2,43 „

Danach betragen die reinen Schiffahrtkosten auf der Strecke Münden — Wernshausen für durchgehende Güter bei Entwurf III nur 63 vH. derjenigen bei Entwurf II und nur 40 vH. derjenigen bei Entwurf I.

B. Gesamtfrachtkosten auf dem Wasserwege und auf der Eisenbahn:

I. Herne-Wernshausen.

1. Entfernungen auf dem Wasserweg.

Herne-Minden	209,0 km,
Schleuse Münster	3,5 „
Schleuse Minden	6,0 „
Minden-Hameln	71,0 „
Schleuse Hameln (nach Erbauung der geplanten Schleppzugschleuse)	3,5 „
Hameln-Münden	135,0 „
Schleuse Münden	3,5 „
Münden-Wernshausen	180,0 „
10 Schleusen je 3,5 km	35,0 „
nach Entwurf III	646,5 km.
45 — 10 = 35 · 3,5	122,5 „
	769,0 km.
+ 1 km Mehrlänge . . .	1,0 „
nach Entwurf II	770,0 km.
45 · 4,5	202,5 „
nach Entwurf I	972,5 km.

2. Entfernungen auf der Eisenbahn.

Herne-Wernshausen	360,0 km.

3. Frachtkosten auf dem Wasserweg.

a) Die Schiffe leichtern nicht in Minden.

Schiffahrtkosten: 110 + 647 . 0,45 Pf.	4,01 ℳ/t,
Nebenkosten, Hafengebühr	0,30 „
Versicherung	0,10 „
Abgaben auf dem Ems-Weser-Kanal: 209 . 0,5 Pf. .	1,05 „
Abgaben auf d. Weser: $\left(\frac{85}{100}\cdot 71+\frac{70}{100}\cdot 135\right)$ 0,02 Pf.	0,03 „
Abgaben auf der Werra: 180 · 0,5 Pf.	0,90 „
nach Entwurf III	6,39 ℳ/t.
123,5 · 0,45	0,56 „
nach Entwurf II	6,95 ℳ/t.
202,5 · 0,45	0,91 „
nach Entwurf I	7,86 ℳ/t.

b) Die Schiffe leichtern in Minden.

Schiffahrtkosten auf dem Kanal: 0,90 + 219 · 0,3 Pf.	1,56 ℳ/t,
dgl. auf Weser und Werra: 428 · 0,45 Pf.	1,93 „
Hafengebühr und Versicherung	0,40 „
Hafen- und Aufenthaltsgebühren in Minden . . .	0,30 „
Abgaben, wie unter a	1,98 „
nach Entwurf III	6,17 ℳ/t.
	0,56 „
nach Entwurf II	6,73 ℳ/t.
	0,91 „
nach Entwurf I	7,64 ℳ/t.

4. Frachtkosten auf der Eisenbahn, 360 km.

Ausnahmetarif 2 (Rohstoffe)	8,50 ℳ/t,
Zechenanschlußfracht	0,10 „
	8,60 ℳ/t.

Hiernach ergibt sich folgende Zusammenstellung:

Frachtkosten Herne-Wernshausen für eine Tonne Kohlen in Mark:

Entwurf I	Entwurf II	Entwurf III	Eisenbahn
a) Ohne Leichterung in Minden.			
7,86	6,95	6,39	8,60
b) Mit Leichterung in Minden.			
7,64	6,73	6,17	8,60.

Die Frachtkosten auf dem Wasserwege stellen sich also für Fall 3 a nach Entwurf I 8,6 vH., nach Entwurf II 19,2 vH. und nach Entwurf III 25,7 vH. billiger als die Frachtkosten auf der Eisenbahn. Für Fall 3 b erhöhen sich diese Sätze auf 11,2, 21,7 und 28,2 vH.

II. Wernshausen-Bremen.

1. Entfernungen auf dem Wasserweg.

Wernshausen-Münden	180,0 km,
10 Schleusen je 3,5 km	35,0 „
Schleuse Münden	3,5 „
Münden-Hameln	135,0 „
Schleuse Hameln (nach Erbauung der geplanten Schleppzugschleuse)	3,5 „
Hameln-Allermündung	190,0 „
Allermündung-Bremerhaven	109,0 „
Schleusen Dörverden und Hemelingen	7,0 „
nach Entwurf III	663,0 km.
	123,5 „
nach Entwurf II	786,5 km.
	202,5 „
nach Entwurf I	989,0 km.

2. Entfernungen auf der Eisenbahn.

Wernshausen-Bremerhaven	443,0 km.

3. Frachtkosten auf dem Wasserweg.

Schiffahrtkosten: 110 + 663 · 0,45	4,08 ℳ/t,
Hafengebühr und Versicherung	0,40 „
Abgaben auf der Werra	0,90 „
Abgaben auf der Weser: $\left(\frac{70}{100}\cdot 135+\frac{85}{100}\cdot 190+\frac{100}{100}\cdot 41\right)$ 0,02 Pfg. . . .	0,06 „
nach Entwurf III	5,44 ℳ/t.
	0,56 „
nach Entwurf II	6,00 ℳ/t.
	0,91 „
nach Entwurf I	6,91 ℳ/t.

4. Frachtkosten auf der Eisenbahn.

Ausnahmetarif 3 (Kali)	8,70 ℳ/t,
Zechenanschlußfracht	0,10 „
	8,80 ℳ/t.

Hiernach ergibt sich folgende Zusammenstellung:

Frachtkosten Wernshausen-Bremen für eine Tonne Kali in Mark:

Entwurf I	Entwurf II	Entwurf III	Eisenbahn
6,91	6,00	5,44	8,80.

Die Frachtkosten auf dem Wasserweg stellen sich demnach nach Entwurf I 21,4 vH., nach Entwurf II 31,7 vH. und nach Entwurf III 38,1 vH. billiger als auf der Eisenbahn.

Außer der Frachtverbilligung kommt zugunsten des Entwurfes III noch die nicht unwesentliche Zeitersparnis bei der Beförderung der Güter in Betracht. Der Geldwert dieser Zeitersparnis ist, soweit dieselbe die Schiffahrtkosten beeinflußt, in den Frachtsätzen zum Ausdruck gebracht. Für den Kaufmann wird aber nicht selten bei der Wahl des Verkehrsweges neben den Frachtpreisen die Zeit ausschlaggebend sein, in welcher die Beförderung möglich ist. Bei einer stündlichen Geschwindigkeit von 5 km werden für die

Befahrung der Werrastrecke nach Entwurf II 25 Std. und nach Entwurf I 41 Std. mehr gebraucht, als nach Entwurf III.

Es ist also nach obigen Darlegungen zu erwarten, daß auf die nach Entwurf III kanalisierte Werra mehr Güter von der Eisenbahn übergehen werden, als wenn sie nach Entwurf I oder II ausgebaut wird.

Landeskultur. Die Vorteile des Entwurfs III gegenüber den anderen beiden Entwürfen hinsichtlich der Landeskultur sind sehr erheblich und teilweise (s. S. 121 u. 129) bereits hervorgehoben. Es möge zusammenfassend darauf hingewiesen werden, daß sich bei Entwurf III nur 10 gegenüber 45 Schleusen mit Wehren in dem Flusse befinden und daß sämtliche anderen Stauwerke beseitigt werden sollen. Hierdurch und infolge der Vergrößerung des Flußquerschnittes wird der Hochwasserabfluß, dessen Spitzen ohnehin durch die Talsperren gemildert werden, ganz bedeutend erleichtert. Durch die vielen kleinen Staue tritt auch gegenüber dem jetzigen Zustande eine Verbesserung der Wasserverhältnisse ein, indem der gewöhnliche Flußwasserstand fast gleichmäßig etwa 1 m unter Talgelände bleibt. Eine Versumpfung oder zu starke Wasserentziehung, wie sie bei Entwurf I und II mit ihren wenigen und starken Gefällen zu befürchten wäre, tritt also nicht ein.

Schlußbemerkung. Diese Gegenüberstellungen zeigen, daß die Torkanalisierung, auf die Werra von Wernshausen bis Münden angewandt, vor der reinen Schleusenkanalisierung wesentliche Vorteile zu haben scheint. Sie ist sowohl in der Anlage wie in den jährlichen Ausgaben billiger, die Fahrzeit der Schiffe und die Schiffahrtkosten sind geringer, der voraussichtliche Verkehr und die aus den Schiffahrtabgaben zu erwartenden Einnahmen sind größer. Außerdem bringt sie dem Werratal Verbesserung der Vorflut und Schutz gegen die Hochwassergefahren. Ein Nachteil ist der, daß ein zwangläufiger Betrieb notwendig ist, der sich erst in der wirklichen Ausführung bewähren muß. Versuche in kleinerem Umfange müssen hier zunächst klärend wirken. Es wird vielleicht möglich sein, sie bei dem geplanten und bereits genehmigten erweiterten Ausbau der Aller anzustellen. Erwünscht sind ferner eine sachliche Kritik und Verbesserungsvorschläge sowohl in wasserbaulicher wie elektrotechnischer Beziehung. Vorher möchten auch wir eine Ausführung im großen noch nicht empfehlen.

Über Wasserabflußversuche an Talsperrenmodellen
in der Königlichen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin.

Von E. Beyerhaus, Königlicher Baurat.

(Mit Abbildungen auf Blatt 15 bis 18 im Atlas.)

(Schluß aus Jahrgang 1913.)

II. Durchlässe in Form überwölbter Maueröffnungen.
A. Versuche an Modellen der Wölfeltalsperre.
(Ausfluß aus einer größeren Maueröffnung in mittlerer Höhenlage.)

Die Wirkungsweise von Durchlässen in Form größerer Maueröffnungen wurde zunächst an im Maßstabe 1 : 60 hergestellten Modellen der rd. 28 m hohen Wölfeltalsperre untersucht, die einen Durchlaß etwa in der Längsachse des Tales in mittlerer Höhenlage besitzt, wie aus der Darstellung des Bauwerks Abb. 7 bis 9 Bl. 73 des vor. Jahrg. ersichtlich. Für die Durchlaßversuche wurde zunächst (im Winter 1907/08) das auch für die Überfallversuche benutzte Modell von 25 cm Breite verwendet, welches, nach den damals gültigen Entwurfszeichnungen aus Paraffin hergestellt, ein 15 m breites Mittelstück der Wölfeltalsperre darstellte (siehe die fein punktierten Grenzlinien auf Abb. 9 Bl. 73 des vor. Jahrg.). Dieses wurde später durch ein gleiches von 50 cm Breite entsprechend 30 m in der Natur ersetzt (siehe die stark gestrichelten Linien in Abb. 9 Bl. 73). Die Herstellung des ganzen Modells im Maßstab 1 : 60 war bei den vorhandenen Einrichtungen mit Schwierigkeiten verknüpft. Die Entwurfszeichnungen wurden bei der Ausführung des Bauwerks, besonders bezüglich der Größe und Form des Durchlasses geändert. Dies kam bei späteren Versuchen zur Geltung, indem die neue Durchlaßform in einem größeren Einsatzstück aus Zement hergestellt wurde, welches in der aus Paraffin gebildeten Mauer befestigt wurde, nachdem ein entsprechender Teil herausgeschnitten war. Es hatte sich gezeigt, daß Öffnungen in voller Genauigkeit in Zement sicherer hergestellt und erhalten werden können. Diese der Ausführung in der Natur entsprechende Form ist mit Modell *A*, die dem Entwurf entsprechende mit Modell *E* bezeichnet.

Bei den ersten Modellversuchen war man vor allem auf die unschädliche Abführung des Wassers bedacht und richtete daher sein Hauptaugenmerk auf das Verhalten des austretenden Wasserstrahls. Dabei zeigte es sich, daß, wie in Abb. 3 Bl. 15 dargestellt, der Strahl bei einem Stauspiegel in Höhe der Mauerkrone über das Sturzbecken hinwegsprang, sonach eine Beruhigung des Wassers durch dieses unmöglich war. Diese unerwartet große Sprungweite erklärt sich daraus, daß der Strahl nicht, wie man vermutet hatte, von der engsten Stelle des Durchlasses aus in freiem Bogen abwärts sprang, wobei er sich schon bald von der oberen wagerechten Begrenzung des Durchlasses hätte ablösen müssen, sondern bis zur Vorderkante an dieser haften blieb, so daß er um den Abstand von der engsten Stelle bis zur Vorderkante weiterspringen konnte. Schon innerhalb des Durchlasses begann überdies der Strahl sich in der Höhenrichtung auszudehnen und sich gleichzeitig in der Breitenrichtung zusammenzuziehen. Da er somit in der Breite den freien Raum nicht ausfüllte, gleichzeitig aber von beiden Seitenwänden angesogen wurde, so trat er im Grundriß nicht gerade, sondern in schräger Richtung bald nach links, bald nach rechts aus, indem er stets an einer Seitenwand haften blieb und sich von der gegenüberliegenden ablöste (siehe den Grundriß Abb. 7 Bl. 15). Da auch die Sprungweite unter den sich gegenseitig bekämpfenden Anziehungskräften der oberen und unteren Wand

stark wechselte, so erschien eine bessere Führung des Strahles dringend erwünscht. Daher wurden zunächst im Abstand von $^1/_4$ der Breite von den Seitenwänden kleine glatte Messingbleche von $^1/_{10}$ mm Dicke in das Modell eingebaut (Abb. 5 und 6 Bl. 15) Der Strahl trat darauf im Grundriß gerade und stetig aus, wie in Abb. 7 Bl. 15 durch gestrichelte Linien dargestellt. Gleichzeitig veränderte sich in geringem Maße die Ausflußmenge, wie die zeichnerische Darstellung Abb. 2 Bl. 15 erkennen läßt. Indem so der Strahl stetiger und ruhiger wurde, wurde der Abflußvorgang klarer und geregelter und konnte besser beobachtet und aufgenommen werden.

Noch andere Mittel wurden versucht, um den Strahl besser zu führen und möglichst rasch ins Sturzbecken herabzuleiten, damit dieses zur Beruhigung voller zur Geltung komme.

Zunächst wurde der Durchlaß dahin abgeändert, daß die Oberwand annähernd parallel der unteren nach abwärts gebogen wurde (vgl. Abb. 8 bis 12 Bl. 15). Die Lichthöhe war im Auslauf 25 mm gegen 22 mm im engsten Teil. Der Querschnitt nahm dadurch von 9,72 auf 11,22 qcm, d. i. um 13,4 vH. zu, so daß eine schwache Saugwirkung entstand, die bewirkte, daß trotz der Reibungswiderstände der Abflußbeiwert, bezogen auf den engsten Querschnitt, nach Abb. 8 Bl. 15 bei allen Druckhöhen ziemlich gleichmäßig den Wert 1 ergab Dabei fiel der Strahl ganz nahe am Mauerfuß ins Sturzbecken, so daß dieses zur vollen Wirkung kam und eine ausreichende Beruhigung des Wassers erreicht wurde. Die Anordnung kann also als sehr günstig bezeichnet und für praktische Ausführungen empfohlen werden.

Ferner wurde vor dem Durchlaß in der ursprünglichen Form nach Abb. 13 bis 15 Bl. 15 ein Überdeckungsblech von oben nach unten allmählich vorgeschoben und bei nahezu gefülltem Staubecken die äußere Strahlform und Durchflußmenge bestimmt. Es ergab sich, daß bei ganz schwacher Überdeckung bis etwa 7 mm zunächst eine geringe Abnahme der Durchflußmenge erfolgte. Bei etwas größerer Überdeckung von etwa 8 mm ab nahm plötzlich die Wassermenge um etwa 25 vH. zu. Dies erklärt sich durch die größere Ablenkung des Strahles nach abwärts, wodurch die Unterseite desselben der Mündungswand so genähert wird, daß das Wasser völlig an die Wand herangesogen wird, die äußere Luft nicht mehr eindringen und die Saugwirkung sich voll zur Vermehrung der Durchflußmenge betätigen kann. Bei weiterem Vorschieben des Bleches wurde dann durch Verkleinerung der freien Öffnung die Durchflußmenge vermindert. In allen Fällen wurde durch das Blech der Strahl dem Mauerfuß mehr genähert und dadurch die Wirkung des Sturzbeckens vermehrt.

Eine ähnliche Wirkung wie das Überdeckungsblech ergab eine unten abgeschrägte, 10 mm starke Holztafel, die in der Nähe der Ausmündung von oben durch die Oberwand allmählich vorgeschoben wurde (Abb. 16 bis 18 Bl. 15). Schon bei einer geringen Vorschiebung, wobei die spitze Kante etwa 2 mm vortrat, wurde der Strahl kräftig nach unten abgelenkt und dem Mauerfuß genähert. Die Saugwirkung ergab sich nicht ganz so stark wie im vorigen Falle.

In ähnlicher Weise, wie ein nur wenig vorgeschobenes Überdeckungsblech durch Abwärtslenkung des Strahles die Saugwirkung und damit die Durchflußmenge vermehrt, tut dies auch über die Krone an der Mauer herabgleitendes Wasser, wenn es auf den Ausflußstrahl trifft, so daß also bei Wirkung des Überfalles die Gesamtmenge nicht nur um die reine Überfallmenge, sondern auch noch um die Wassermenge zunimmt, um welche hierdurch der Ausfluß aus dem Durchlaß vermehrt wird (vgl. die Abb. 1 u. 24 Bl. 15). Schließlich wurde noch des Vergleiches halber der abgerundete Einlauf des Durchlaßkanals in einen scharfkantigen abgeändert. Dabei ergab sich eine Verminderung der Durchflußmenge um etwa 15 vH. Der Durchflußbeiwert μ kam, wie auf Abb. 24 Bl. 15 zu erkennen, mit 0,97 bis 0,98 sehr nahe an 1 heran, was gegenüber dem sonst bei scharfkantigen Mündungen beobachteten Werte von etwa 0,62 auf eine sehr starke Saugwirkung durch den sich nach außen erweiternden Durchlaßkanal schließen läßt.

Bei dem ursprünglichen Entwurf der Wölfeltalsperre hatte man für den Durchlaß eine Abflußmenge von 35 cbm in Aussicht genommen und, um völlig sicher zu sein, daß mindestens diese Menge bei einem Stauspiegel in Höhe der Mauerkrone zum Abfluß gelangen könne, mit einem sehr kleinen Ausflußbeiwert gerechnet und einen entsprechend großen Querschnitt vorgesehen, der daher auch bei den bisher besprochenen Modellversuchen mit den in Abb. 4 Bl. 15 angegebenen Maßen zur Anwendung gekommen ist. Da diese Versuche nun einen unerwartet hohen Beiwert, und zwar von etwa 1,1 ergaben, so wurde bei der Ausführung des Bauwerks ein wesentlich kleinerer Querschnitt (entsprechend den im Schnitt ab Abb. 11 Bl. 15 angegebenen Maßen) hergestellt, der für die Wassermenge von 35 cbm einem Beiwert $\mu = 0,84$ entspricht. Man glaubte wohl mit der Möglichkeit rechnen zu müssen, daß sich in der Natur ein kleinerer Beiwert als im Modell ergeben könnte. Überdies ist es ja auch weit leichter, einen solchen Durchlaß nachträglich zu verengen, als zu erweitern. Da es nun dringend erwünscht erschien, nicht nur mit Rücksicht auf dieses Bauwerk, sondern auch für alle späteren Talsperrenbauten größere Klarheit über die in der Natur unter solchen Verhältnissen wirklich austretenden Wassermengen und ihr Verhalten beim Ablauf zu erhalten, so beschloß die Leitung der schlesischen Talsperrenbauten, im Frühjahr 1909 durch Verschluß des Durchlasses die erforderliche Wassermenge im Staubecken zu sammeln, um sie zu geeigneter Zeit zu Beobachtungszwecken abfließen zu lassen.

Daher wurde vor Eintritt der zu erwartenden Frühjahrshochwasser an der Einmündung des genannten Durchlasses eine Brettertafel so befestigt, daß sie nur wenig Wasser an ihren Rändern vorbeiließ (Abb. 1 Bl. 17) und bei Lösung ihrer Befestigung dem Wasserdruck nachgeben mußte. Nachdem am 3. Mai 1909 die später zu beschreibenden, in Abb. 8 Bl. 17 und Abb. 1 bis 12 Bl. 18 dargestellten Versuche an den Grundablaßrohren stattgefunden hatten, erfolgte am 4. Mai vormittags 9 Uhr bei einem Stauspiegel von 6,85 m über Durchlaßsohle (die 12 m unter der Sperrmauerkrone liegt) in Gegenwart der hierbei beteiligten Behörden die Lösung der Holztafelbefestigung, so daß diese von dem Wasser durch die Öffnung hindurchgerissen wurde und zunächst mit dem ausströmenden Wasser und durch dieses verdeckt an der Mauer hinabglitt. Dieser Augenblick ist durch Abb. 2 Bl. 17 festgehalten, wo der Wasserknoten unterhalb der Öffnung von dem Anprall gegen die herabgleitende Holztafel herrührt. Den weiteren

Verlauf zeigen die Abb. 3, 4 u. 5 Bl. 17. Man sieht, wie das Sturzbecken nicht imstande ist, die volle Menge des wild schäumenden Wassers zu fassen und zum ruhigen Abfluß zu bringen. Abb. 6 Bl. 17 zeigt, wie bei verringerter Durchflußmenge (nach Abnahme der Druckhöhe) unter der Anziehungswirkung der beiden Seitenwände des Durchlasses in der Mitte eine ziemlich tiefe Furche im Ausflußstrahl entsteht. Zugleich zeigt sich hier, wie auch bei den anderen Bildern, daß der Strahl an der rechten Seite mehr anliegt als an der linken, die Hauptausflußmenge also etwas nach rechts gerichtet ist. Der rechts gelegene Teil des Sturzbeckens füllte sich daher stärker an und trieb das Wasser etwas schräg nach links durch das Abflußgerinne, so daß dessen linkes Ufer stärker angegriffen wurde. Dies läßt Lichtbild Abb. 6 Bl. 17 klar erkennen und außerdem die starke Hinterspülung der Abschlußmauer des linken Sturzbeckenteils. Daß das Wasser nicht axial ausfließt, ist eine Folge der zu großen Weite der Ausflußmündung. Die Richtung des schrägen Austritts hängt in solchen Fällen von zufälligen, schwer erkennbaren Nebenumständen ab.

Neben dieser Erfahrung erwies sich der Versuch besonders nach zwei Richtungen außerordentlich lehrreich, einmal in bezug auf die Ausbildung des Sturzbeckens, dessen Umfassungsmauern sich als zu niedrig ergaben, also nachträglich erhöht werden mußten, zweitens bezüglich der Ausflußmenge, welche beträchtlich größer war, als man vermutet hatte. Die Bestimmung derselben erfolgte auf Grund der von fünf zu fünf Minuten stattgehabten Ablesung des Staupegels aus der Abnahme des Staubeckeninhalts, der nach den Profilaufnahmen berechnet wurde. Bezeichnet h die jeweilige Höhe des Stauspiegels über dem Schwerpunkt des Durchlaßquerschnitts f an seiner engsten Stelle, so berechnet sich die Ausflußmenge bei nicht zu kleinen Druckhöhen zu:

$$Q = \mu \cdot f \cdot \sqrt{2gh}.$$

Ist die Druckhöhe kleiner als die doppelte Lichthöhe der Mündung, so rechnet man genauer nach $Q = \mu \cdot \frac{2}{3} b \left(h_u^{\frac{3}{2}} - h_o^{\frac{3}{2}}\right)$, wo h_u den Abstand der Unterkante, h_o den der Oberkante der Mündung von dem Wasserspiegel und b die Breite bedeutet. Für größere Druckhöhen liefern beide Gleichungen dieselben Werte. Setzt man nun die aus den Pegelbeobachtungen ermittelten Werte von Q ein, so ergibt sich die auf Abb. 24 u. 29 Bl. 15 dargestellte μ-Linie und danach für den Anfang des Vorganges ein Wert von $\mu = 1,35$, der dann stetig abnimmt bis zu 0,73 für einen Wasserstand in Höhe von Oberkante Durchlaß. Vergleicht man hiermit die in Abb. 24 Bl. 15 mit „E ohne Führungsbleche" bezeichnete Linie der μ-Werte des Durchlaßmodells nach der Entwurfszeichnung, so erkennt man zwar im allgemeinen insofern eine Ähnlichkeit, als auch hier der μ-Wert nach unten hin stetig abnimmt. Doch zeigt sich bei höheren Wasserständen für die Versuche in der Natur ein auffallend größerer Wert als im Modell, indem für den Beginn der Naturversuche und eine Stauhöhe von 6,6 m, die etwas über 11 cm Höhe im Modell entspricht, sich ein Beiwert von $\mu = 1,35$ ergibt gegenüber etwa 1,09 im Modell. Um für dies unerwartete Ergebnis die Ursachen zu erforschen, stellte man in der Versuchsanstalt ein Modell her, dessen Durchlaßform der des ausgeführten Bauwerks genau entsprach, und zwar aus reinem Zement, wobei sich die Form genauer festhalten läßt, während Paraffin sich sehr mit der Temperatur ändert und auch leichter unbemerkten Beschädigungen ausgesetzt ist. Es wurde nun bei verschiedenen Stauhöhen die Wassermenge und das Verhalten des Ausflußstrahles beobachtet. Daneben wurden durch geeignete Vorrichtungen die Druckverhältnisse im Innern des Durchlasses besonders an der engsten Stelle zu erforschen gesucht. Es ergab sich dabei, daß hier unter Umständen ein sehr beträchtlicher Saug- oder Unterdruck gegenüber dem äußeren Luftdruck als Folge der Erweiterung des Kanals nach der Mündung hin entstehen kann, wodurch die wirksame Druckhöhe und damit die Ausflußmenge beträchtlich vermehrt wird. Der Durchlaß ist, abgesehen von den Abrundungen am Einlauf, seitlich von senkrechten parallelen Wänden, oben von einem in der Längsrichtung wagerecht verlaufenden Segmentgewölbe begrenzt, während die Unterfläche von der engsten Stelle aus stark nach abwärts gekrümmt ist, um das Herabfallen des Wassers in das Sturzbecken zu begünstigen. Man hatte nun wohl geglaubt, daß der Strahl von der engsten Stelle an sich im wesentlichen wie ein frei austretender verhalten werde, da die obere und untere Wandung hierfür genügenden Spielraum boten. Dies würde wohl auch zweifellos der Fall sein, wenn das ganze Bauwerk sich im luftleeren Raum befände. Durch den Druck der äußeren Luft und durch die gegenseitige Einwirkung von Luft und Wasser aufeinander im Innern des Durchlasses ändert sich aber, wie die Versuche gelehrt haben, die Sachlage sehr wesentlich, und zwar hauptsächlich dadurch, daß jeder Wasserstrahl an seinem äußeren Umfange stets beträchtliche Luftmengen mitreißt. Diese Wirkung wird besonders bei großen Geschwindigkeiten dadurch sehr vermehrt, daß der Luftwiderstand Wirbel an der äußeren Strahlbegrenzung erzeugt, wodurch diese rauh und bei sehr großen Geschwindigkeiten sogar stark zerrissen und zerklüftet wird. Steigert sich die Wirkung noch mehr, so löst sich der Strahl sprühregenartig auf und geht bei weiterer Steigerung in ein staub- und schaumartiges Gemisch von Luft und Wasser über, wie man bei allen größeren Wasserfällen in der Natur beobachten kann, bis zu einem gewissen Grade auch bei weitgehenden Strahlen der Feuerspritzen. Diesem, den Zusammenhang des Wassers zerreißenden Einfluß der Luft wirkt nur die Kohäsion des Wassers entgegen, und da diese Kraft stets dieselbe bleibt, während die Angriffskraft auf die Flächeneinheit des Umfangs mit der Vergrößerung des Maßstabes wegen der dadurch bedingten Vergrößerung der Geschwindigkeit wächst, so muß diese Wirkung viel stärker zunehmen als der Maßstab und kann, sobald die Kraft sich bis zur Überwindung des Kohäsionswiderstandes gesteigert hat, plötzlich Erscheinungen zutage treten lassen, die auf Grund kleiner Modellversuche nicht — oder wenigstens lange nicht in dem Maße zu erwarten waren. Etwas ähnliches finden wir bei dem in Röhren fließenden Wasser, welches bekanntlich bei Steigerung der Geschwindigkeit plötzlich aus der „laminaren" oder gleitenden in die „turbulente" d. h. mit Wirbelung verbundene Bewegung übergeht und dann ganz anderen Gesetzen folgt. So ist es erklärlich, daß, wie die Abb. 3, 4 u. 5 Bl. 17 zeigen, der aus dem Durchlaß des Bauwerks austretende Wasserstrom stark zerrissen und zerklüftet ist, während er unter völlig ähnlichen Verhältnissen im kleinen Modell wenigstens an der oberen Begrenzung fest zusammenhängend und glatt bleibt.

Erfolgt der Austritt von der engsten Stelle aus in eine ringsum freie Umgebung, so kann der praktisch bedeutsame Einfluß der die Wasserfäden zerreißenden Wirkung der Luft nur der sein, daß das Wasser mehr zerteilt und mit geringerer Geschwindigkeit unten ankommt, ohne daß sich die Ausflußmenge dadurch ändert. Diese Sachlage wird aber ganz anders, sobald der Strahl von der engen Stelle aus sich in der Nähe fester Wandungen weiter bewegt. Dadurch, daß das Wasser die Luft der Umgebung großenteils mitreißt, entsteht zwischen Wasser und Wand ein luftverdünnter Raum, wodurch die wirksame Druckhöhe und damit die Wassermenge vermehrt wird. Zugleich aber sucht die Luft von außen in den luftverdünnten Zwischenraum einzudringen. Die so entstehende Gegenströmung der Luft vermehrt ihre hemmende und aufrauhende Wirkung auf das Wasser. Da jede Geschwindigkeitsverzögerung bei strömenden Flüssigkeiten eine entsprechende Ausdehnung des Querschnittes bedeutet, so wird damit der Zwischenraum zwischen Wand und Wasser verengt und damit die luftsaugende Wirkung verstärkt. Bald werden die äußeren Wasserteilchen durch die vermehrte Gegenströmung der Luft mehr und mehr zerrissen, so daß sich der Zwischenraum zunächst mit einem Gemisch von Luft und Wasser und schließlich, wenn die Saugwirkung stark genug ist, ganz mit Wasser füllt. Auf diese Weise wird der Strahl, an seinen Rändern an der Stelle beginnend, wo er sich sonst ablösen würde, allmählich weiter fortschreitend aus seiner natürlichen Richtung abgelenkt und zum Anliegen an die benachbarte Wand gebracht. Veranschaulicht wird das Wesen des eben beschriebenen Vorgangs durch die Text-Abb. 59 bis 68.

Die Saugwirkung von konischen Erweiterungen ist bereits in früheren Zeiten durch Versuche von Venturi und Eitelwein nachgewiesen (vgl. Rühlmanns Hydromechanik § 109). Doch handelte es sich hierbei um ziemlich schlanke Formen mit geradlinigen Begrenzungen, so daß daraus keine sicheren Schlüsse auf den Einfluß der viel stärkeren und krummlinigen Erweiterung des vorliegenden Durchlaßkanals gezogen werden konnten.

Die am Modell des ausgeführten Bauwerks (Modell *A*) angestellten Versuche bestätigen nun die obigen Darlegungen, wonach die auf dem wechselseitigen Einfluß von Luft und Wasser beruhenden Saugwirkungen im kleinen Modell, zumal wenn dieses nur $^1/_{60}$ der natürlichen Größe besitzt, wesentlich von der Erscheinung im großen verschieden sein können. Dies zeigt der Verlauf des Beiwertes μ, wie er in Abb. 24 u. 29 Bl. 15 für die Ergebnisse des Modells *A* dargestellt ist. Besonders beachtenswert ist, daß zwischen den Stauhöhen von 2,7 und 7,5 cm über Unterkante Durchlaß zwei ganz verschiedene μ-Werte hervortraten, je nachdem der Strahl an der oberen oder unteren Wand voll anlag. Bei großen Druckhöhen tritt der Strahl naturgemäß mehr wagerecht gestreckt aus und nähert sich daher mehr der oberen Wand, bei geringen Druckhöhen aber krümmt er sich unter dem Einfluß der Schwerkraft mehr nach abwärts und nähert sich daher mehr der unteren Wand. Je näher aber ein Wasserstrahl einer Wand kommt, mit um so größerer Kraft wird er von dieser angesogen. Infolgedessen wird er auch mit größerer Kraft festgehalten, wenn er einmal anliegt, als angezogen, wenn er noch nicht anliegt. Hierin liegt die Möglichkeit zweier verschiedenen Strahlformen bei derselben Druckhöhe begründet, wodurch dann zugleich zwei sehr verschiedene μ-Werte entstehen. Dies wurde grundsätzlich, wenn auch unter wesentlich anderen Verhältnissen, schon von Bidone festgestellt, wie in Rühlmanns Hydromechanik S. 284 (§ 107 Zusatz 5) näher beschrieben ist.

Bei den in Rede stehenden Versuchen an Modell *A* löste sich beim Stauspiegel in Höhe der Überfallkrone der Strahl, wie Abb. 40 Bl. 15 zeigt, schon kurz hinter der engsten Stelle von der Unterwand ab, so daß keine wesentliche Saugwirkung entstehen konnte und $\mu = 0{,}98$ wurde (vgl. Abb. 24 u. 36 Bl. 15). Bei fallendem Wasser blieb der Strahl, wie auch beim höchsten, an der oberen Wand bis vornehin haften; da er sich aber bei Verminderung der Druckhöhe stärker zu krümmen suchte, vermehrte sich die Saugwirkung an der Unterwand, so daß die Ablösung später erfolgte, also der auf die engste Stelle bezogene Beiwert μ zunehmen mußte. Dieser erreichte so schließlich bei einer Stauhöhe von etwa + 2,7 cm über Unterkante Durchlaß den Wert 1,4. Dann riß[3]) das Wasser plötzlich oben ab und bei vollem Anliegen an der Unterseite rückte die Ablösungsstelle oben so weit zurück, daß der Beiwert μ plötzlich auf 1,14 herunterging und, bei weiterem Absinken des Stauspiegels, bis zur Höhe von Durchlaßoberkante den Wert 1,12 erreichte.

Liegt dagegen entsprechend Abb. 41 bis 46 Bl. 15 der Strahl zunächst unten bis vornehin an, was bei niedrigem Stauspiegel der Fall ist, so wird er bei steigendem Wasser sich mehr wagerecht zu strecken und unten abzulösen bestrebt sein. Doch erst bei einer Stauhöhe von etwa 7,5 cm, die indessen sehr schwankend und von Zufälligkeiten abhängig war,[4]) riß der Strahl unten ab und, unter vollem Anliegen oben, ging die Ablösungsstelle unten so weit zurück, daß der Ausflußbeiwert plötzlich von $\mu = 1{,}21$ auf $\mu = 1{,}08$ herunter sank und nun bei weiterem Steigen des Stauspiegels bis zur Mauerkrone allmählich bis auf 0,98 abnahm, also denselben Gesetzen wie bei sinkendem Stauspiegel folgte. Bevor diese Ablösung unten erfolgte, war μ also mit steigendem Stauspiegel stetig gewachsen. An der Schnittstelle der beiden μ-Linien bei 5,1 cm ergaben beide Strahlformen, sowohl die oben, wie die unten voll anliegende denselben Beiwert $\mu = 1{,}19$. Oberhalb dieser Stauhöhe war die oben anliegende Form die stabilere und leichter von selbst eintretende, unterhalb desgleichen die unten anliegende. Die Unstabilität ist bei den μ-Linien in Abb. 24 u. 36 Bl. 15 durch Strichelung zum Ausdruck gebracht.

Das Verhalten des Strahles bei vollem Anliegen an der Oberwand ist in Abb. 40 Bl. 15 und den Text-Abb. 59 bis 68 dargestellt. Letztere zeigen, wie sich bei fallendem Wasser von der Stauhöhe = 16 cm über Durchlaßsohle ab an der Strahlunterkante ein Wasserschleier bildet, der mit weiter fallendem Stauspiegel allmählich größer und dann immer dichter wird, bis schließlich der Strahl sich ganz an die Mauer anlegt (Text-Abb. 67). Dagegen war bei Modell *E* (Abb. 3 Bl. 15) selbst beim höchsten Stauspiegel der ganze Raum

3) Die Stauhöhe, bei welcher dies Abreißen erfolgt, ist schwankend und von Zufälligkeiten abhängig.

4) Bei verhältnismäßig raschem Ansteigen des Stauspiegels trat in einzelnen Fällen auf ganz kurze Zeit auch bei höheren Wasserständen bis herauf zu 14,5 cm der Fall des vollen Anliegens an der Unterseite ein.

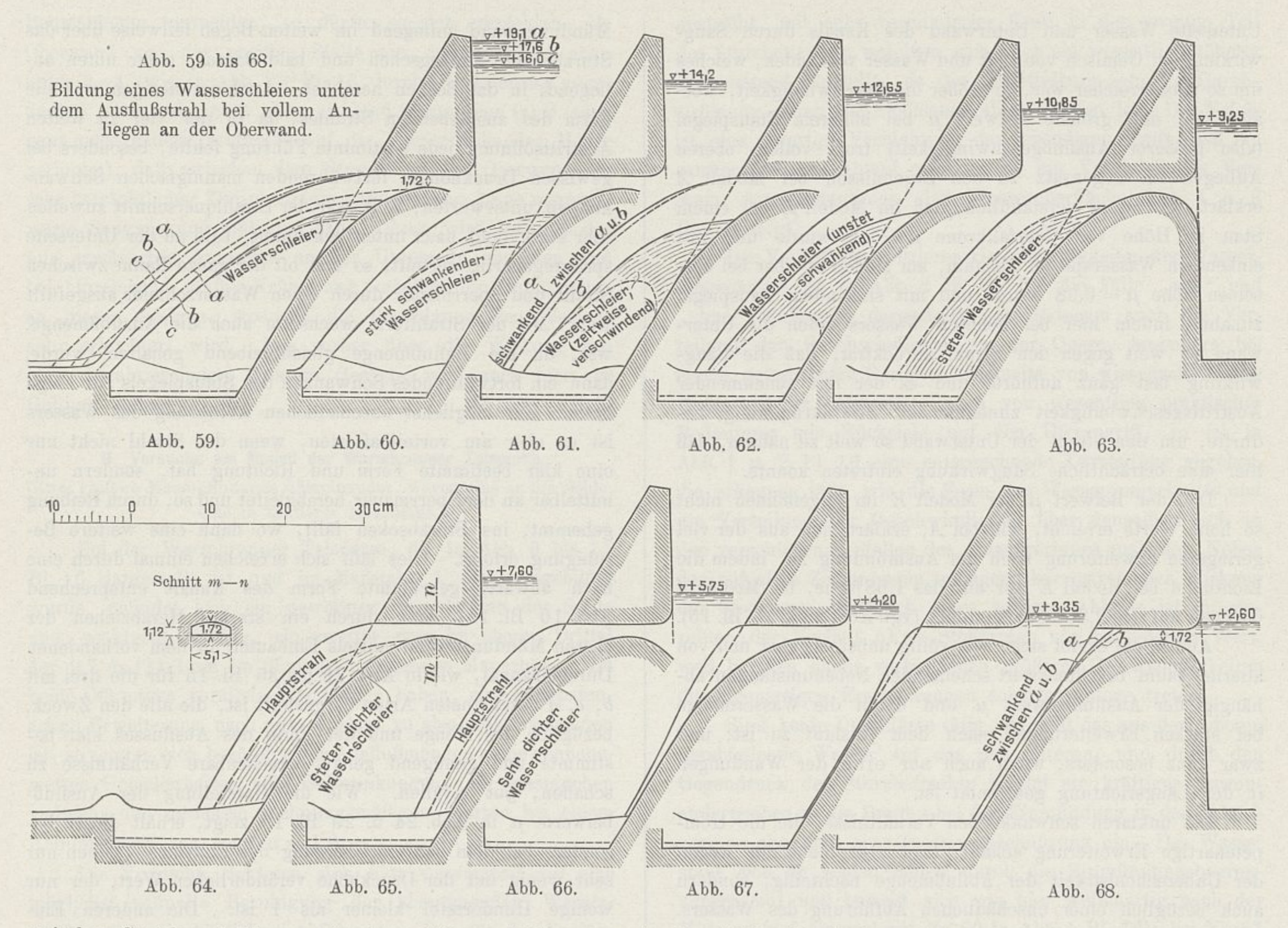


Abb. 59 bis 68.
Bildung eines Wasserschleiers unter dem Ausflußstrahl bei vollem Anliegen an der Oberwand.

Abb. 59. Abb. 60. Abb. 61. Abb. 62. Abb. 63.

Abb. 64. Abb. 65. Abb. 66. Abb. 67. Abb. 68.

zwischen Strahl und Mauer mit einem Wasserschleier ausgefüllt, der mit fallendem Wasser sich nicht derart änderte, wie bei Modell *A*. Auch wurde bei Modell *E* das gleichzeitige volle Anliegen oben und unten nicht beobachtet, welches bei Modell *A* während des Absinkens des Stauspiegels von + 5,75 auf + 4,20 cm entstand und naturgemäß eine besonders starke Saugwirkung und damit einen großen Ausflußbeiwert erzeugte.

Bei den Versuchen in der Natur erfolgte, wie aus den Abb. 4 u. 6 Bl. 17 zu schließen, unter Anliegen des Strahles an der Unterwand, die Ablösung an der Oberwand in einer schrägen Linie, entsprechend etwa der Grenzlinie *1* oder *3* des Falles *d* in Abb. 41 Bl. 15, und zwar schon bei Beginn der Versuche, d. i. bei 6,85 m Höhe über Unterkante Durchlaß, entsprechend 11,3 cm im Modell. Rechts lag der Strahl oben beinahe voll bis vornehin an, während er links weiter zurücktrat. Die Grenzhöhe, bis zu welcher ein volles Anliegen an der Unterseite möglich, liegt also in der Natur wesentlich höher, als nach den Modellversuchen zu erwarten gewesen wäre. Die Wirkung des Wassergewichts in Verbindung mit der Saugwirkung an der Unterseite ist also in der Natur gegenüber der Saugwirkung an der Oberseite verhältnismäßig stärker als im Modell. Bei fallendem Wasser mußte das stärkere Krümmungsbestreben des Strahles in Verbindung mit der Abnahme der Saugkraft an der Oberseite durch die Abnahme der Geschwindigkeit ein Zurücktreten der Ablösungsstelle an der Oberseite und damit eine Abnahme des Beiwertes μ veranlassen. Ob bei wesentlich größerer Druckhöhe im Anfang eine Ablösung des Strahles an der Unterseite erfolgt wäre und damit ein wesentlich kleinerer Durchflußbeiwert μ eingetreten wäre, läßt sich nach den Modellversuchen vielleicht vermuten, aber aus den vorher dargelegten Gründen nicht mit Bestimmtheit sagen.

Es sei noch bemerkt, daß das Gewicht des Wassers im Ausflußkanal mit der dritten, die Umfangsfläche mit der zweiten Potenz des Maßstabes und die Geschwindigkeit mit der Quadratwurzel wächst. Es müßte also die Saugkraft für die Flächeneinheit des Umfanges genau mit dem Quadrat der Ausflußgeschwindigkeit wachsen, wenn die Gesamtverhältnisse sich mit dem Maßstab nicht ändern sollen. Da aber die Größe der Saugkraft sich nach ganz anderen Gesetzen zu ändern scheint, so kann in allen Fällen, wo eine von der Geschwindigkeit abhängige Saugkraft in Wirksamkeit tritt, und besonders, wenn sie wie hier der Schwerkraft entgegenwirkt, ein völlig gleichartiges Verhalten in der Natur wie im Modell nicht erwartet werden. Eintretende Verschiedenheiten dürfen also in solchen Fällen kein Befremden erregen.

Modell *E* unterscheidet sich von Modell *A*, wie in Abb. 23 u. 28 und Abb. 38 bis 40 Bl. 15 angedeutet ist, hauptsächlich dadurch, daß die Lichthöhe des Durchlasses um etwa 28 vH. größer und die Unterwand nicht so stark nach abwärts gekrümmt ist, also auch bei größeren Druckhöhen der Strahlunterkante näher liegt. Da die Krümmung sanfter ist, trat keine so plötzliche, scharf bestimmte Ablösung des Strahles von der Unterwand ein, vielmehr war auch bei vollem oberen Anliegen in dem engen Zwischenraum zwischen

Unterseite Wasser und Unterwand des Kanals durch Saugwirkung ein Gemisch von Luft und Wasser vorhanden, welches um so wasserreicher war, je größer die Geschwindigkeit, woraus sich der größere Beiwert μ bei höherem Stauspiegel (also größerer Ausflußgeschwindigkeit) trotz vollem oberen Anliegen im Gegensatz zu den Ergebnissen bei Modell A erklärt. So ist es verständlich, daß im Modell E bei einem Stau in Höhe von Überfallkrone $\mu = 1{,}1$ wurde und mit sinkendem Wasserspiegel abnahm, am Modell A aber bei derselben Höhe $\mu = 0{,}98$ wurde und mit sinkendem Stauspiegel zunahm, indem hier bei höheren Wasserständen die Unterwand so weit gegen den Strahl zurücktrat, daß die Saugwirkung fast ganz aufhörte und es der mit abnehmender Austrittsgeschwindigkeit zunehmenden Strahlkrümmung bedurfte, um den Strahl der Unterwand so weit zu nähern, daß hier eine beträchtliche Saugwirkung eintreten konnte.

Daß der Beiwert μ bei Modell E im allgemeinen nicht so hohe Werte erreicht, wie bei A, erklärt sich aus der viel geringeren Erweiterung nach der Ausmündung zu, indem die Lichthöhe bei Modell E nur auf das 1,68fache, bei Modell A dagegen auf das 2,38fache zunimmt (vgl. Abb. 23 u. 28 Bl. 15).

Aus allem ergibt sich, wie völlig unberechenbar und von allerlei kaum beachtenswert scheinenden Nebenumständen abhängig der Ausflußbeiwert μ und damit die Wassermenge bei starken Erweiterungen nach dem Auslauf zu ist; und zwar ganz besonders, wenn auch nur e i n e der Wandungen in der Längsrichtung gekrümmt ist.

Die unklaren schwankenden Verhältnisse, die die trompetenartige Erweiterung schafft, sind aber nicht nur wegen der Unberechenbarkeit der Abflußmenge nachteilig, sondern auch bezüglich einer unschädlichen Abführung des Wassers. Hierbei kommt noch ein anderes Gesetz zur Geltung, welches sich aus den in § 99 in Rühlmanns Hydromechanik dargestellten Versuchen von Lesbros ergibt, daß nämlich jeder Wasserstrahl nach Verlassen der engsten Stelle das Bestreben hat, seine Querschnittsform umzukehren; d. h. die am weitesten vom Mittelpunkt gelegenen Strahlgrenzen suchen sich diesem zu nähern und treiben die vorher nahe gelegenen weiter ab. So wird ein, wie im vorliegenden Falle, erst niedriger und breiter Querschnitt bald hoch und schmal, so daß er der Breite nach den Durchflußkanal nicht mehr ganz ausfüllen kann. Da nun aber jede der beiden Seitenwände ihn durch Saugkraft festzuhalten sucht, so kann er sich nicht gleichzeitig von beiden Seiten ablösen, sondern die vom Zufall begünstigte Seite erhält das Übergewicht und bringt so den Strahl in eine s c h i e f e A u s f l u ß r i c h t u n g, eine Erscheinung, die sowohl bei den Modellversuchen, wie in der Natur in auffallender Weise zutage trat (vgl. Abb. 7 Bl. 15, Abb. 6 u. 7 Bl. 16 und Abb. 4 bis 6 Bl. 17). Bei manchen Talsperren hat diese Erscheinung sogar sehr schädliche Folgen gehabt, indem das austretende Wasser, anstatt sich geradeaus durch das Ablaufgerinne fortzubewegen, schräg gegen eine der Seitenböschungen losstürzte, hier emporstieg und große Zerstörungen durch Hinterspülungen anrichtete.

Bei den Modellversuchen zeigte der Ausflußstrahl besonders bei bestimmten Druckhöhen ein sehr unstetiges fortwährend sich änderndes Verhalten, indem er bald an der linken Wand anliegend schräg nach links, bald rechts anliegend schräg nach rechts ausströmte und bald an der oberen Mündungswand anliegend im weiten Bogen teilweise über das Sturzbecken hinwegschoß und bald darauf, mehr unten anliegend, in das Becken herabfiel. Auch im übrigen war die Form des ausfließenden Strahles, da in der viel zu weiten Austrittsöffnung jede bestimmte Führung fehlte, besonders bei gewissen Druckhöhen, fortwährenden mannigfachen Schwankungen unterworfen; z. B. war der Strahlquerschnitt zuweilen sehr stark hohl nach unten gekrümmt, bald an der Unterseite sprühregenartig zerteilt, so daß oft der ganze Raum zwischen Strahl und Sperrmauer durch einen Wasserschleier ausgefüllt war. Mit der Strahlform wechselte auch die Ausflußmenge, was, da die Zuflußmenge gleichbleibend gehalten wurde, dann ein fortwährendes Schwanken des Stauspiegels zur Folge hatte. Zur möglichst unschädlichen Abführung des Wassers ist es aber am vorteilhaftesten, wenn der Strahl nicht nur eine klar bestimmte Form und Richtung hat, sondern unmittelbar an der Sperrmauer herabgleitet und so, durch Reibung gehemmt, ins Sturzbecken fällt, wo dann eine weitere Beruhigung erfolgt. Dies läßt sich erreichen einmal durch eine nach abwärts gekrümmte Form des Kanals entsprechend Abb. 10 Bl. 15, dann durch ein starkes Herabziehen der oberen Mündungswand mittels Einbauten in dem vorhandenen Durchlaßkanal, wie in Abb. 29 bis 35 Bl. 15 für die drei mit b, c, d bezeichneten Arten dargestellt ist, die alle den Zweck, bezüglich der Menge und der Form des Ausflusses klar bestimmte und genügend genau berechenbare Verhältnisse zu schaffen, gut erfüllen. Wie die Darstellung der Ausflußbeiwerte μ in Abb. 24 u. 29 Bl. 15 zeigt, erhält dieser besonders bei dem sanften Übergang des Einbaues d einen nur sehr wenig mit der Druckhöhe veränderlichen Wert, der nur wenige Hundertstel kleiner als 1 ist. Die anderen Einbauten b und c ergeben wegen des weniger sanften Überganges infolge von Einschnürungswirkungen etwas geringere Ausflußbeiwerte. Bei allen drei Einbauten glitt das Wasser an der Wand herunter und mußte so das Sturzbecken vom Mauerfuße an durchlaufen, so daß dieses zur Beruhigung voll zur Wirkung kam.

Eine merkwürdige Erscheinung verdient noch erwähnt zu werden. Wenn der Überlauf in Wirksamkeit trat, so daß das Wasser an der Mauer auch über die Öffnung des mit einem Einbau an der Oberwand versehenen Durchlasses hinwegglitt, so bildete diese dünne Wasserwand gewissermaßen einen Luftabschluß für den oberen Teil der Durchlaßmündung. Es konnte hier also ein luftverdünnter Raum entstehen, indem sowohl an der Oberseite des Ausflußstrahles, wie an der Hinterseite des Überfallwassers Luft mitgerissen wurde. Die entstehende Luftverdünnung äußerte sich dadurch, daß das herabrieselnde Wasser an der oberen Durchlaßkante eine plötzliche scharfe Wendung nach dem Durchlaßinnern machte und der Ausflußstrahl etwas nach oben hin zu sprühen begann und sein sonst glattes Aussehen an der Oberseite verlor. Um dies zu vermeiden, kann man am Scheitel des Durchlaßgewölbes einen starken Vorsprung anordnen mit oberer dachartiger Begrenzung, so daß das herabrieselnde Wasser in der Mitte zerteilt wird und eine Öffnung für den Eintritt der Luft in den oberen Teil des Durchlasses gebildet wird.

Will man eine Längskrümmung der oberen Kanalwand nach abwärts mit Rücksicht auf etwa im Wasser treibende

Baumstämme vermeiden, so dürfte es sich empfehlen, die Oberwand von der engsten Stelle aus derart kräftig etwa unter 1 : 4 (wie in Abb. 23 Bl. 15 durch Punktierung angedeutet) oder mehr nach oben steigend anzuordnen (z. B. auch ganz oder nahezu senkrecht auf die Vorderfläche der Mauer gerichtet), daß zwischen dem Strahl und der Oberwand ein sehr beträchtlicher Zwischenraum entsteht, also keine nennenswerte Saugwirkung eintreten kann. Dann wird lediglich das nur erwünschte Ansaugen an der Unterseite eintreten und bei hinreichend sanfter Krümmung derselben ein Herabgleiten an dieser erfolgen, wodurch die Beruhigung des Wassers sehr erleichtert wird. Das vorher über die Wirkung von oben herabrieselnden Wassers Gesagte wird auch hier zur Geltung kommen.

B. Versuche am Modell der Warmbrunner Talsperre.

(Zwei größere Maueröffnungen übereinander, wovon eine an der Sohle, eine in mittlerer Höhenlage.)

Bei der Warmbrunner Talsperre, die in Abb. 9 bis 11 Bl. 16 dargestellt ist und im Maßstabe 1 : 40 nachgebildet wurde, befindet sich ein gewölbter Durchlaß an der Sohle und, senkrecht darüber, ein zweiter etwa im oberen Drittel der 9,7 m (24,3 cm im Modell) betragenden Mauerhöhe. Da beide Öffnungen parallele Wandungen haben, eine trompetenartige Erweiterung nach dem Auslauf zu also nicht vorhanden ist, so zeigten sich bezüglich der Ausflußmengen keine nennenswerten Unsicherheiten oder Schwankungen, sie entsprachen vielmehr den normalen rechnungsmäßigen Werten bei einem Abflußbeiwert von rund $\mu = 1{,}0$.

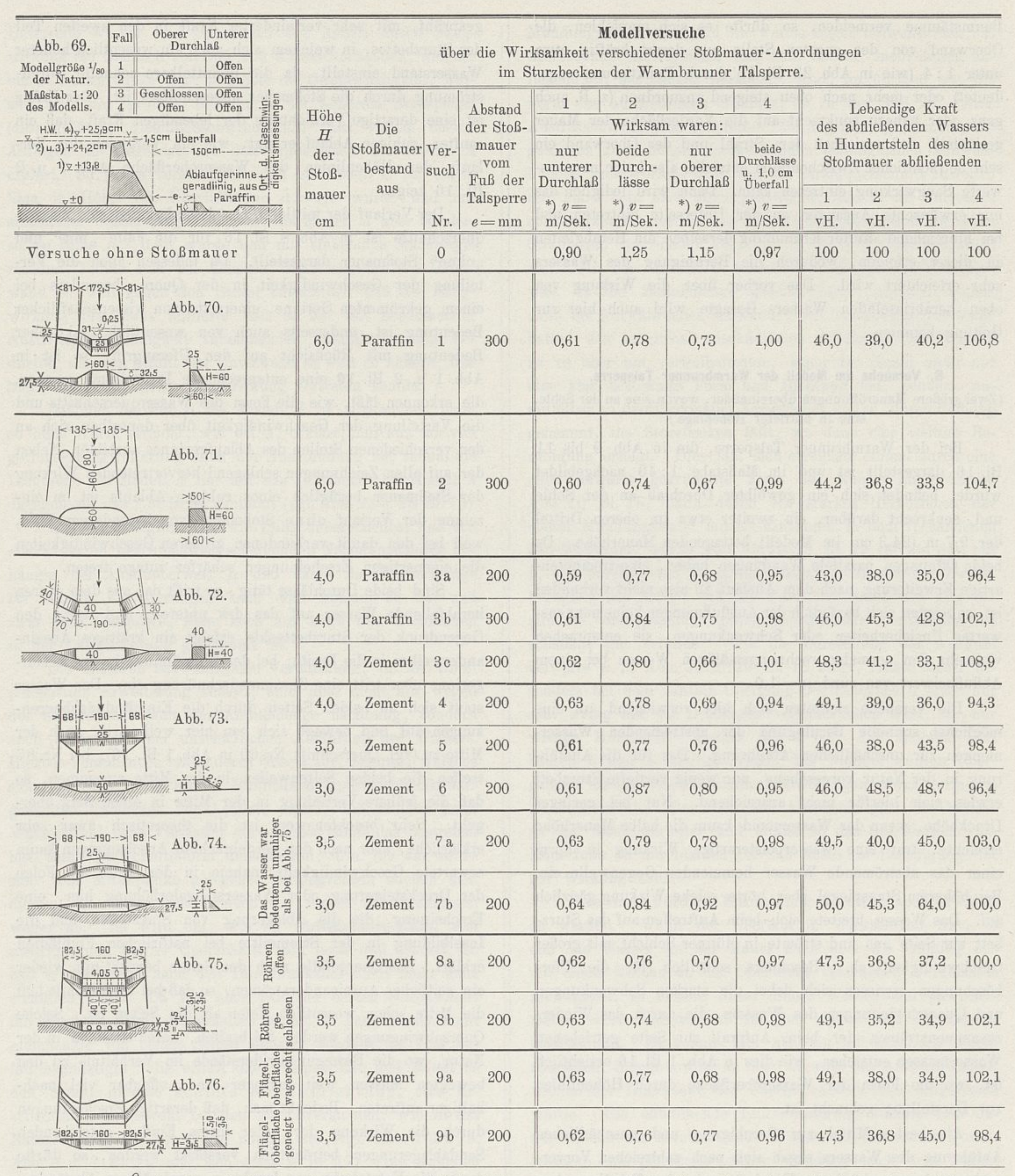
Die Versuche richteten sich hier vorwiegend auf eine möglichst schnelle Beruhigung der abströmenden Wassermengen zur unschädlichen Abführung. Das für die Ausführung in der Natur vorgesehene, nur wenig vertiefte Sturzbett erwies sich hierfür nicht ausreichend. Nur bei geringer Druckhöhe, wenn der Wasserstand kaum die halbe Mauerhöhe erreichte, trat eine wasserpolsterartige Wirkung in Form einer das abströmende Wasser hemmenden Gegenwelle ein. Bei höherem Stauspiegel aber hörte solche Wirkung gänzlich auf. Das Wasser breitete sich beim Auftreffen auf das Sturzbett zur Seite aus und strömte in dünner Schicht mit großer Geschwindigkeit ab. Besonders schädlich für die Uferböschungen erwiesen sich dabei die starken Schwankungen und Querschwingungen des Wassers, die durch das Wiederzusammenströmen der beim Aufprall zur Seite getriebenen Wassermassen entstehen, wie dies in Abb. 1 Bl. 16 ersichtlich ist, wo die Form der Wasseroberfläche durch Höhenlinien zur Darstellung gebracht ist.

Als bestes Mittel zur Beruhigung und unschädlichen Abführung des Wassers ergab sich nach zahlreichen Vorversuchen, deren wichtigste Ergebnisse in der Tabelle neben den Text-Abb. 69 bis 76 zusammengestellt sind, eine Stoßmauer nach Art der Text-Abb. 75, welche überdies in Abb. 1 u. 2 Bl. 16 im Grundriß und in Abb. 3 bis 5 Bl. 16 im Schnitt und Ansicht sichtbar ist. Diese teilt das Sturzbett in zwei aufeinander folgende Teile und erzeugt einerseits durch Aufstauung ein tieferes und daher wirksameres Wasserpolster, anderseits hemmt sie das Wasser und zwingt es zu mehrfacher scharfer Richtungsänderung. Das Wasser springt im Bogen über die Stoßmauer hinweg und fällt, auseinandergesprüht, mit sehr verminderter Kraft in den zweiten Teil des Sturzbettes, in welchem sich auch ein wesentlich höherer Wasserstand einstellt, da die unmittelbare schnelle Durchströmung durch die Stoßmauer abgeschnitten ist. Der Erfolg ist eine derartige Vernichtung der lebendigen Kraft, daß ein sanfter, ruhiger Ablauf erfolgt, wie ein Vergleich des Verlaufs der Höhenlinien der Wasseroberfläche Abb. 1 u. 2 Bl. 16 zeigt.

Der Verlauf der mittleren Geschwindigkeiten der Wasserquerschnitte ist in Abb. 8 Bl. 16 für die Fälle „mit“ und „ohne“ Stoßmauer dargestellt. Da indessen auch die Verteilung der Geschwindigkeit in der Quere, besonders bei einem gekrümmten Gerinne, einerseits von wissenschaftlicher Bedeutung ist, anderseits auch von wesentlich praktischer Bedeutung mit Rücksicht auf den Uferangriff, so ist in Abb. 1 u. 2 Bl. 16 eine entsprechende Darstellung gegeben, die erkennen läßt, wie die Form des Wasserquerschnitts und die Verteilung der Geschwindigkeit über denselben sich an den verschiedenen Stellen des Ablaufgerinnes ausbildet. Neben der auf allen Zeichnungen schlagend hervortretenden Wirkung der Stoßmauer bezüglich eines ruhigen Ablaufs ist im einzelnen der Verlauf ohne Stoßmauer von besonderem Wert, weil bei den damit verbundenen größeren Geschwindigkeiten die eigenartigen Erscheinungen schärfer zutage treten.

Sind beide Durchlässe tätig, so trifft das aus dem oberen herabfallende Wasser auf das des unteren, und durch den Gegendruck der Sturzbettsohle erfolgt ein kräftiges Auseinandertreiben in die Breite; bei der Einmündung in das Ablaufgerinne aber tritt eine Zusammenschnürung ein. Das Wasser staut sich an beiden Seiten durch die Einmündungsbegrenzungen auf und bewegt sich von hier wellenartig nach der Mitte zu (vgl. Querschnitt Nr. 60 in Abb. 1 Bl. 16); bei Nr. 87 treffen die beiden Seitenwellen in der Mitte zusammen, so daß die frühere Vertiefung in der Mitte in einen Berg übergeht. Sehr beachtenswert ist die theoretisch zwar sehr erklärliche, aber nach den hergebrachten Anschauungen kaum erwartete Geschwindigkeitsabnahme in der Mitte als Folge der Drucksteigerung oder Wasserspiegelerhöhung hier, eine Erscheinung, die die Ablagerung von Sinkstoffen und die Inselbildung in der Strommitte bei natürlichen Flußläufen erklärt. Das Quergefälle nach den Seiten bewirkt nun wieder ein seitliches Auseinanderströmen, so daß bei Querschnitt 120 die Mitte schon wesentlich tiefer als die Seiten ist. Solche Querschwingungen werden bei breiten, tiefen Strömen in der Natur, wo die Bewegungswiderstände im Verhältnis zu den bewegten Massen weit geringer sind, offenbar viel nachhaltiger auftreten. Bedenkt man, daß derartige Erscheinungen durch die Wirkung der unter ihrem Einfluß entstehenden Sandablagerungen beträchtlich verstärkt werden, so dürfte damit die Entstehung von Inseln in regelmäßigen Abständen, wie z. B. im Rheingau zwischen Mainz und Bingen, erklärt sein.

Der Einfluß der Krümmung des Gerinnes tritt am schärfsten bei dem alleinigen Ausfluß aus dem unteren Durchlaß hervor, wobei der obere Durchlaß geschlossen war. Von hervorragender Bedeutung ist dabei, daß nicht nur am einbuchtenden Ufer eine negative Geschwindigkeit (Bergströmung) auftritt, was nach Naturbeobachtungen allgemein bekannt ist, sondern daß in der geraden Strecke unterhalb der Krümmung eine Art Reaktionserscheinung zutage



Modellversuche
über die Wirksamkeit verschiedener Stoßmauer-Anordnungen
im Sturzbecken der Warmbrunner Talsperre.

		Höhe H der Stoßmauer cm	Die Stoßmauer bestand aus	Versuch Nr.	Abstand der Stoßmauer vom Fuß der Talsperre e = mm	1 Wirksam waren: nur unterer Durchlaß *) v = m/Sek.	2 beide Durchlässe *) v = m/Sek.	3 nur oberer Durchlaß *) v = m/Sek.	4 beide Durchlässe u. 1,0 cm Überfall *) v = m/Sek.	Lebendige Kraft des abfließenden Wassers in Hundertsteln des ohne Stoßmauer abfließenden 1 vH.	2 vH.	3 vH.	4 vH.
Versuche ohne Stoßmauer				0		0,90	1,25	1,15	0,97	100	100	100	100
Abb. 70.		6,0	Paraffin	1	300	0,61	0,78	0,73	1,00	46,0	39,0	40,2	106,8
Abb. 71.		6,0	Paraffin	2	300	0,60	0,74	0,67	0,99	44,2	36,8	33,8	104,7
Abb. 72.		4,0	Paraffin	3a	200	0,59	0,77	0,68	0,95	43,0	38,0	35,0	96,4
		4,0	Paraffin	3b	300	0,61	0,84	0,75	0,98	46,0	45,3	42,8	102,1
		4,0	Zement	3c	200	0,62	0,80	0,66	1,01	48,3	41,2	33,1	108,9
Abb. 73.		4,0	Zement	4	200	0,63	0,78	0,69	0,94	49,1	39,0	36,0	94,3
		3,5	Zement	5	200	0,61	0,77	0,76	0,96	46,0	38,0	43,5	98,4
		3,0	Zement	6	200	0,61	0,87	0,80	0,95	46,0	48,5	48,7	96,4
Abb. 74.	Das Wasser war bedeutend unruhiger als bei Abb. 75	3,5	Zement	7a	200	0,63	0,79	0,78	0,98	49,5	40,0	45,0	103,0
		3,0	Zement	7b	200	0,64	0,84	0,92	0,97	50,0	45,3	64,0	100,0
Abb. 75.	Röhren offen	3,5	Zement	8a	200	0,62	0,76	0,70	0,97	47,3	36,8	37,2	100,0
	Röhren geschlossen	3,5	Zement	8b	200	0,63	0,74	0,68	0,98	49,1	35,2	34,9	102,1
Abb. 76.	Flügeloberfläche wagerecht	3,5	Zement	9a	200	0,63	0,77	0,68	0,98	49,1	38,0	34,9	102,1
	Flügeloberfläche geneigt	3,5	Zement	9b	200	0,62	0,76	0,77	0,96	47,3	36,8	45,0	98,4

*) $v = \frac{Q}{F}$; der Querschnitt F wurde 150 cm vom Fuß der Talsperre gemessen. Bei späteren Versuchen mit gekrümmtem und längerem Gerinne aus Zement ergaben sich allgemein kleinere Geschwindigkeiten und bessere Wirkungen der Stoßmauer, z. B. bei Versuch Nr. 8b Fall 2: $v = 0,54$ mit, 1,18 ohne Stoßmauer und $\left(\frac{0,54}{1,18}\right)^2 = 21,0$ vH.

tritt, indem unterhalb des ausbuchtenden (konvexen) Ufers die Geschwindigkeit mehr und mehr zu-, unterhalb des einbuchtenden (konkaven) aber mehr und mehr abnimmt und hier schließlich sogar, wenn auch nur in geringem Maße, negativ wird. Nach diesem Gesetz muß also an einem geraden Ufer, welches sich an ein einbuchtend gekrümmtes unterhalb anschließt, eine Ablagerung von Sinkstoffen erfolgen, die den Strom in verstärktem Maße nach dem gegenüberliegenden herüberdrängt und so dort einen Angriff erzeugt, der den Anfang zu neuer Krümmung bildet. Dieses Gesetz hat sich bei Versuchen im Flußbaugerinne sehr deutlich bestätigt und erklärt die bekannte Neigung der Flüsse, einen

fortgesetzt sich schlängelnden (serpentinierenden) Lauf anzunehmen, und kommt auch bei den sogenannten wandernden Geschiebebänken zur Geltung.

Für die praktische Bauausführung erscheint es von besonderer Wichtigkeit, dafür zu sorgen, daß das über die Stoßmauer herüberspringende Wasser auf ein gut befestigtes, kräftiges Sturzbett von reichlicher Länge fällt. Größere wagerecht austretende Wassermassen werden daher im allgemeinen nicht durch ein einfaches Wasserpolster zu besiegen sein, sondern, sofern die Druckhöhe und damit die Austrittsgeschwindigkeit nicht zu groß (vgl. das später auf S. 163 bei den Grundablaßrohren Gesagte), indem man es aus einer Art Vorkammer über eine Stoßmauer in ein Sturzbett hineinspringen läßt, in welchem es seine ausreichende Beruhigung findet. Die Stoßmauer muß natürlich in ganz besonderer Weise gegen den Anprall des Wassers gesichert sein, wohl am besten durch tief eingreifende Eisenanker innerhalb der aus vorzüglichem Beton bestehenden Mauer. Die Kosten kommen dabei wenig in Betracht, da es sich nur um eine sehr geringe Mauermasse handelt. In den meisten Fällen dürfte eine sehr flache Böschung von 1:2 auf der stromabgelegenen Seite die Eiseneinlagen entbehrlich machen, falls eine Inanspruchnahme erst nach genügender Erhärtung erfolgt und eine innige Verbindung mit dem Fundament gesichert ist. Die Ablagerung von Sand vor der Stoßmauer kann durch Einlegen von eisernen Rohren verhindert werden, welche die Wirkung der Mauer nicht wesentlich beeinflussen.

Daß in der Natur derartige Maßnahmen zur Beruhigung des abfließenden Wassers erforderlich sind, haben die bisher dort gemachten und hier bekannt gewordenen Beobachtungen gezeigt. Eine merkwürdige und zunächst rätselhafte Erscheinung war die, daß das Wasser aus dem unteren Durchlaß nicht geradeaus in der Verlängerung seiner Achse ausströmte, die zugleich die Mitte des Ablaufgerinnes bildet, sondern schräg zur Seite. Es rannte dann an einer Seitenböschung in die Höhe und hinterspülte diese. Der Grund hierfür dürfte in der ziemlich schwachen Abrundung der Einmündung des Durchlasses liegen, wobei der Einlauf in diesen unter Zusammenschnürung erfolgt, also der Wasserstrom den Durchlaßkanal nicht ganz ausfüllt. Infolgedessen entstehen zwischen dem Wasserstrom und den Wandungen Saugwirkungen, die den Strom an die Wand heranzuziehen suchen. Diese Saugwirkung wird um so stärker, je mehr sich der Strahl der Wand nähert, so daß diejenige Seitenwand, der sich der Strahl durch zufällige Nebenumstände etwas mehr nähert, diesen völlig an sich reißt und so in eine schiefe Richtung lenkt. Ein derartiges Streben nach einer Seite zeigte im Modell in gewissem Maße auch der Ausfluß des oberen Durchlasses, wie die Grundrißdarstellung auf Bl. 16 zeigt. Durch eine kräftige Abrundung der Einmündung würde sich in solchen Fällen ein gerader Austritt des Strahles erzielen lassen, falls an der Ausmündung keine Querschnittserweiterung weder in wagerechtem noch in senkrechtem Sinne stattfindet. Doch wird dieser Umstand ziemlich bedeutungslos, wenn die besprochene Stoßmauer ausgeführt wird. Ferner wurde an der ausgeführten Talsperre beobachtet, daß der Angriff des Wassers auf die Sohle bedeutend stärker wurde, sobald der obere Durchlaß zu wirken anfing. Dies erklärt sich nach den Beobachtungen am Modell (vgl. Abb. 6 Bl. 16) dadurch, daß durch das Auftreffen des oberen Abflußstrahles auf den unteren ein noch stärkeres seitliches Auseinandertreiben entsteht. Je stärker aber der Wasserstrom zunächst in die Breite getrieben wird, um so kräftiger fließt er weiter unterhalb wieder zusammen, so daß hier eine äußerst unruhige, wilde Strömung mit fortgesetzten Querschwingungen entsteht, die sehr geeignet ist, Zerstörungen an der Sohle und den Ufern anzurichten.

III. Grundablaßrohre.

Das aus Grundablaßrohren ausströmende Wasser läßt sich, wie eingehende Versuche an der ausgeführten Wölfeltalsperre gezeigt haben, unter Umständen am einfachsten unschädlich abführen, wenn man es durch einen Krümmer derart in eine im Grundriß zur Sperrmauer parallele Richtung ablenkt, daß es das längs des Mauerfußes sich hinziehende Sturzbecken auf eine möglichst große Strecke durchfließen muß. Infolge der starken Ausbreitung, die das Wasser dabei erfährt, beruhigt es sich bald. Es ist dabei zu beachten, daß die Biegung des Krümmers beträchtlich mehr als 90° betragen muß, wenn das Wasser im rechten Winkel seitlich abgelenkt werden soll, da das Wasser den Austrittsquerschnitt des Krümmers nicht ausfüllt, sondern sich in hohem Maße zufolge der Fliehkraft nach der äußeren Seite hindrängt, wodurch die Ausströmung spitzwinklig zur Mündungsebene des Krümmers erfolgt.

Die am 3. Mai 1909 an den Grundablaßrohren der Wölfeltalsperre in der Natur mit verschiedenen Mündungsformen ausgeführten Versuche sind durch die Abb. 8 Bl. 17 u. 1 bis 12 Bl. 18 veranschaulicht. Der Stauspiegel stand bei Beginn der Versuche etwa 20 m über den Mündungen der 0,60 m im Lichten weiten, 17,5 m langen Grundablaßrohre, die einen gut abgerundeten Einlauf und 3 m vor der Mündung einen normalen Schieberverschluß besitzen. Bei voller Öffnung desselben flossen etwa 3,5 bis 4 cbm in der Sekunde ab.

Zunächst wurde bei freier Ausmündung (ohne Ansatzstück) der Schieber des linksseitigen Rohres halb geöffnet, wobei, wie Abb. 8 Bl. 17 zeigt, das Wasser heftig über die Abschlußmauer des Sturzbeckens hinwegstürzte. Bei voller Schieberöffnung wurde der Angriff auf die Mauerhinterfüllung so stark, daß rasch wieder geschlossen werden mußte. Die Art des Angriffs ist in Abb. 1 Bl. 18 ersichtlich. Das rechtsseitige Rohr hatte einen kurzen Krümmer von 90°, dessen Mündung um 60° schräg aufwärts nach der Mitte des Sturzbeckens gerichtet war. Den Wasseraustritt bei halber Öffnung des Schiebers zeigt Abb. 1 Bl. 18 von hinten, Abb. 2 Bl. 18 von vorn gesehen; ebenso bei ganzer Öffnung Abb. 3 u. 4 Bl. 18, während Abb. 5 Bl. 18 zeigt, daß zufolge der sprühregenartigen fächerförmigen Zerteilung des Wassers der Angriff auf die Mauerhinterfüllung nur gering ist. Es sind nur die feineren Teile an der Oberfläche weggespült. Das Wasser wurde durch den Krümmer von 90° nur um etwa 50 bis 60° abgelenkt, da der Austritt schräg zur Mündungsebene erfolgte. Eine bessere Umlenkung würde jedenfalls erreicht durch Anbringen eines geraden Rohrstückes als äußere Mündung vor dem Krümmer, wodurch auch zugleich das Wasser mehr zusammengehalten würde. Den Ausfluß aus einem Krümmer von 45° in wagerechter Bie-

gung zeigt Abb. 5 Bl. 18 bei halb, Abb. 6 Bl. 18 bei ganz geöffnetem Schieber. Die in letzterem Falle erfolgende schädliche Überströmung der Sturzbettmauer wird, wie Abb. 8 Bl. 18 zeigt, noch bedeutend stärker, wenn der Krümmer um 45° schräg nach aufwärts gedreht ist. Abb. 7 Bl. 18 zeigt den Austritt bei halb geöffnetem Schieber. Neigte man statt dessen denselben Krümmer um 30° schräg nach abwärts, so wurde, wie weitere Versuche zeigten, ein Übertreten des Wassers über die Umfassungsmauer vermieden. Derselbe günstige Erfolg zeigte sich bei einem Krümmer von 90°, wenn dieser nach der Beckenmitte hingedreht war, und zwar sowohl in wagerechter Ebene, als unter 30° schräg abwärts geneigt. Da aber im letzteren Falle der Angriff auf die Sohle stärker ist, erscheint es am zweckmäßigsten, die Grundablaßrohre mit einem Krümmer von mindestens 90° in wagerechter Ebene zu versehen.

Des allgemeinen Interesses halber wurde auch noch der Krümmer von 90° senkrecht nach aufwärts gerichtet. Den Ausfluß zeigen die Abb. 9 u. 10 Bl. 18 bei halb, Abb. 11 u. 12 Bl. 18 bei ganz geöffnetem Schieber. In letzterem Falle sprang das Wasser etwa 12 m hoch und fast 40 m weit.

Es kommen aber auch Fälle vor, daß man das aus Grundablaßrohren ausströmende Wasser unter möglichst rascher Beruhigung geradeaus weiter zu führen wünscht. Nach dieser Richtung haben erfolgreiche Versuche in der diesseitigen Anstalt stattgefunden. Eine einfache Stoßmauer, wie sie sich vor dem gewölbten Grundablaß im Modell der Warmbrunner Talsperre sehr wirksam gezeigt hatte, erwies sich bei größerer Druckhöhe als unzweckmäßig, indem das Wasser so hoch in die Höhe spritzte, daß eine Fassung und unschädliche Abführung fast unmöglich wurde. Läßt man das Wasser statt gegen eine senkrechte gegen eine schräge Fläche laufen, so wird zwar das Hochspritzen vermieden, aber die Abströmungsgeschwindigkeit auch nur wenig vermindert. Eine rasche und kräftige Vernichtung der lebendigen Kraft läßt sich, nach den ausgeführten Versuchen zu schließen, nur durch Gegenströmungen und Wirbel erreichen. Solche zu erzeugen muß also in erster Linie erstrebt werden. Zu dem Zweck muß dafür gesorgt werden, daß das Wasser möglichst gleich vom Austritt aus dem Rohr ab von rückläufigem Wasser umgeben ist, an welches es seine lebendige Kraft abgeben kann, indem es dasselbe mitzureißen sucht. Dies läßt sich nach angestellten Versuchen in zweckmäßiger Weise erreichen, wenn man nach Text-Abb. 77 u. 78 das Rohr in ein oben offenes oder geschlossenes Gerinne eintreten läßt, dessen Breite etwa das Drei- bis Vierfache des lichten Rohrdurchmessers beträgt und dessen Wandungen in der Nähe der Rohrmündung etwa fünf Rohrdurchmesser hoch sind, später aber bis auf zwei Durchmesser abnehmen können. Nahe vor der Rohrmündung ist eine geeignete treppenförmige Stoßmauer zur Erzeugung der Gegenströmung eingebaut. Sie besteht aus einer Treppe von etwa vier Stufen, deren jede etwa $^1/_6$ des Rohrdurchmessers hoch ist, und einer daranschließenden senkrechten Abschlußwand, die mindestens den lichten Rohrdurchmesser zur Höhe hat, so daß die Oberkante der ganzen Stoßmauer die des Zuströmungsrohres um wenigstens die Treppenhöhe (oder etwa $^2/_3$ Rohrdurchmesser) überragt. Es hat sich aus zahlreichen Versuchen mit Bestimmtheit ergeben und ist auch aus dem Wesen des Vorganges leicht zu erklären, daß gerade die Verbindung der Vortreppe mit der senkrechten Abschlußwand wenigstens bei großer lebendiger Kraft des Wassers von entscheidender Bedeutung für eine möglichst günstige und zuverlässige Wirkung ist. Die Abschlußwand allein läßt, wie früher besprochen, das Wasser hoch in die Höhe springen; die Treppe allein ist zwar jedenfalls besser, als eine glatte Fläche von entsprechender Neigung; aber mit großer Geschwindigkeit ankommendes Wasser vermag sie allein auch nicht genügend aufzuhalten. Dieses strömt vielmehr mit nur wenig verminderter Geschwindigkeit über die Treppe weg, ohne daß es zu der erforderlichen Rückströmung kommt. Letztere entsteht aber mit Sicherheit durch die Vereinigung von Treppe und Abschlußwand, die sich bei großen Wassergeschwindigkeiten als noch wirksamer erwiesen hat, als die Treppe mit stark zunehmender Steigung ohne Abschlußwand (nach Text-Abb. 37 bis 40 S. 677 vor. Jahrg.), wiewohl beide Anlagen im wesentlichen denselben leitenden Grundsatz zum Ausdruck bringen. Wie wichtig die Treppe ist, zeigte sich bei einem Versuche, bei welchem dieselbe mit einem schrägen Bleche abgedeckt wurde (sieh Text-Abb. 80 u. 81). Durch die schräge Fläche und die Abschlußwand wurde das Wasser zwar sehr kräftig in seiner direkten Bewegung gehindert, aber da die lebendige Kraft nicht genügend vernichtet wurde, wich das Wasser derart lebhaft zu beiden Seiten aus, daß es an den Seitenwänden des Gerinnes sehr hoch in die Höhe stieg, in der Mitte eine schluchtartig tiefe Furche lassend. Die Text-Abb. 80 u. 81 zeigen, wie das Wasser beiderseits über die hohen Gerinnwände herübersprüht. Da ein rückwärts gerichteter Gegenwirbel nicht zustande kam, war auch der Strahl beim Austritt aus dem Rohr nicht wesentlich von rückläufigem Wasser umgeben, so daß der ganze Vorgang ein grundsätzlich anderes Gepräge von weit geringerer Wirkung annahm, als bei freiliegender Treppe.

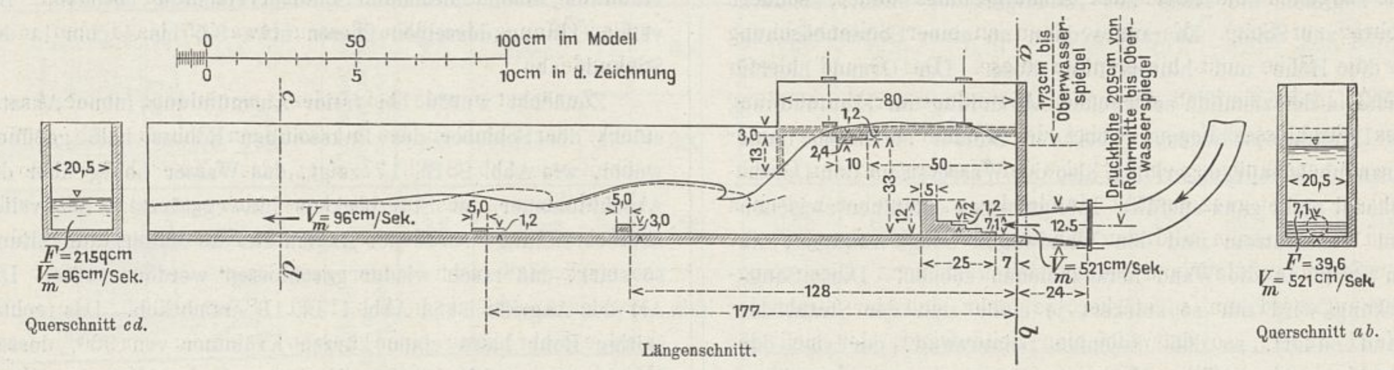


Abb. 77. Wasserberuhigung bei Grundablaßrohren.

Abb. 78 bis 83. Wasserberuhigung bei Grundablaßrohren durch einen Kasten mit eingebauter Treppe nebst Abschlußwand.

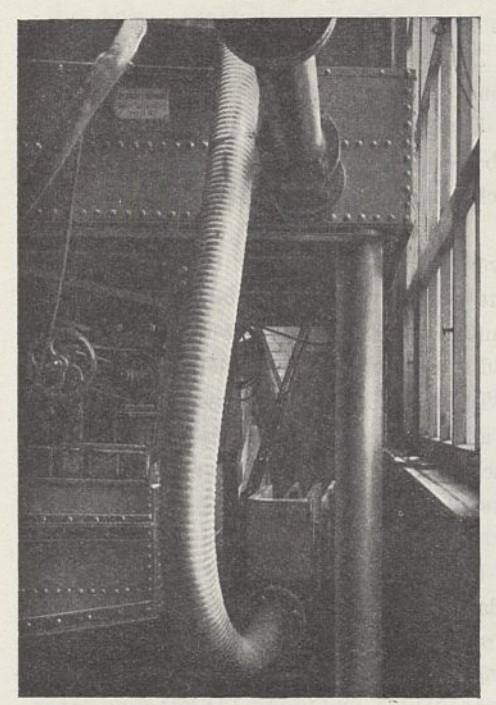


Abb. 78. Ansicht von oben.

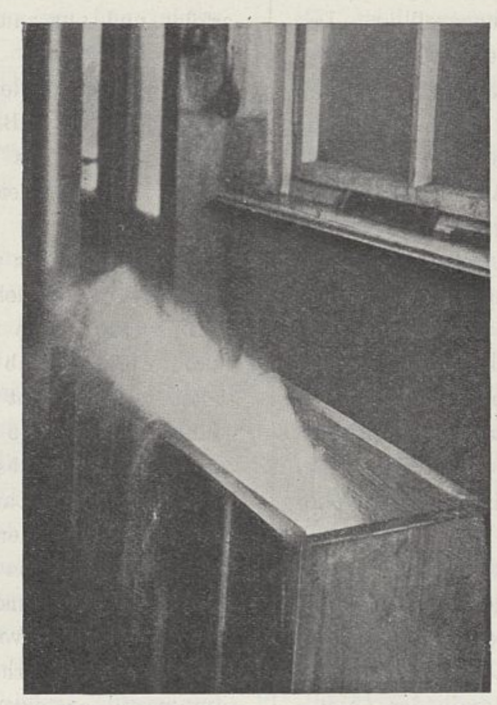


Abb. 80. Ansicht von oben.



Abb. 82. Ansicht von oben.

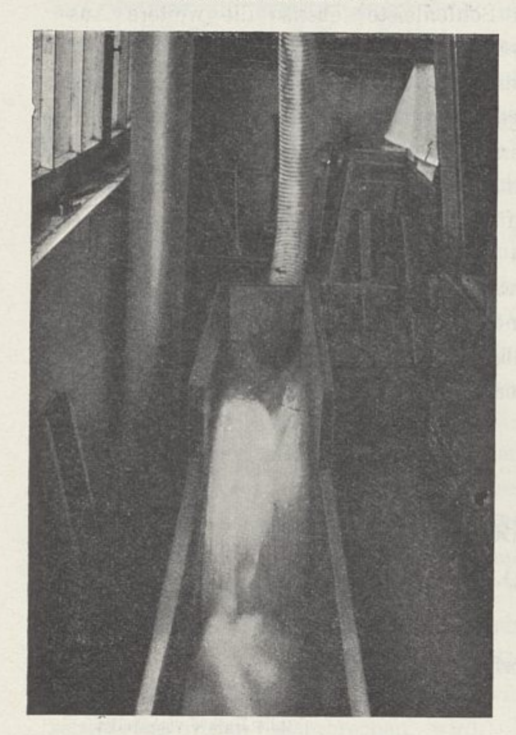


Abb. 79. Ansicht von unten.

Abb. 78 u. 79. Vorrichtung in voller Wirksamkeit.

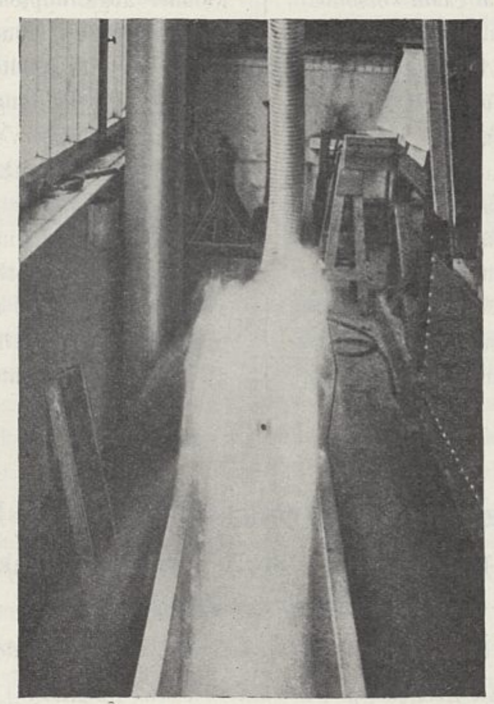


Abb. 81. Ansicht von unten.

Abb. 80 u. 81. Wirkung eines Abdeckbleches nur über der Treppe.

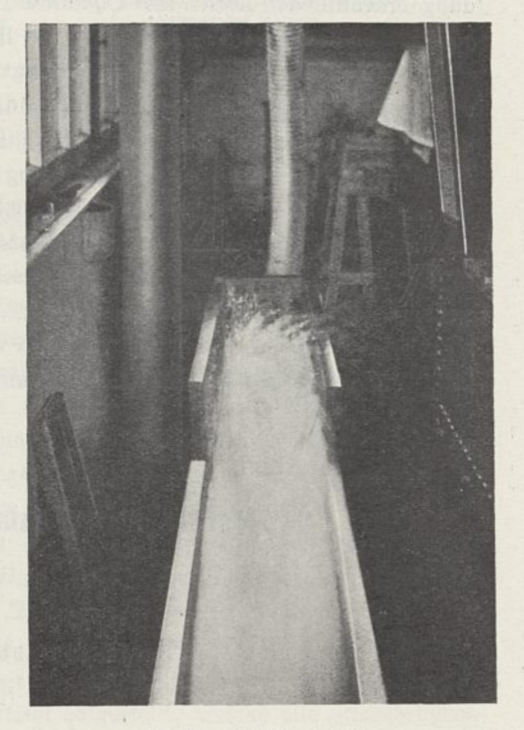


Abb. 83. Ansicht von unten.

Abb. 82 u. 83. Wirkung eines Abdeckbleches über Treppe und Abschlußwand.

Noch ungünstiger war die Wirkung, wenn die Treppe samt Abschlußwand als Ganzes durch ein gerades Blech abgedeckt wurde (Text-Abb. 82 u. 83). Das Wasser wurde auch zur Seite gedrängt, so daß es an den Wänden des Gerinnes hochstieg, behielt aber gleichzeitig noch soviel vorwärts gerichtete Strömungskraft, daß es nach Verlassen des Abdeckbleches in weitem Bogen weitersprang, durch Spritzen und Schäumen die noch vorhandene lebendige Kraft kundgebend, wie dies die Text-Abb. 82 u. 83 gut erkennen lassen. Im Gegensatze dazu zeigen die Text-Abb. 78 u. 79 sowie die Text-Abb. 77 die vorzügliche Wirkung der unverdeckten Treppe nebst Abschlußwand. Diese Wirkung beruht auf der Entstehung von Wirbeln in drei aufeinander senkrechten Ebenen, und zwar durch die Wirkung der Treppe, die das Wasser seitlich auseinandertreibt, hauptsächlich in wagerechtem und quer zur Achse gerichtetem Sinne, durch die Wirkung von Treppe und Abschlußwand gemeinschaftlich in senkrechtem, mit den Seitenwänden parallelem Sinne, also in ganzer Breite erst aufwärts und rückwärts, dann abwärts und vorwärts, wobei eine sehr lebhafte obere Gegenströmung entsteht, die das unten zuströmende Wasser in besonders starker Weise verzögert. Ähnlich wirkt der genannte Wirbel

in wagerechtem Sinne, der den Strahl von beiden Seiten angreift, während der Wirbel in der Querrichtung d. h. in Ebenen senkrecht zur Achse weniger wirkungsvoll ist. Da bei dieser Anordnung ein Hochspritzen des Wassers vermieden wird, so würde hier die beträchtliche Erhöhung der Wände in der Nähe der Stoßmauer fast entbehrlich sein. Um das Wasser auf seinem weiteren Wege noch mehr zu beruhigen, dienen die in Text-Abb. 77 gezeichneten Querleisten, welche, wenn in genügendem Abstande von der Treppe und untereinander angebracht, eine Art Wassersprung mit wirbelnder Gegenströmung in den oberen Schichten erzeugen und damit weiter auf Verzehrung der verbliebenen lebendigen Kraft wirken. Es wurde so erreicht, daß das mit 5,21 m zuströmende Wasser mit 0,96 m Geschwindigkeit abfloß, womit also die Geschwindigkeit auf rd. 18,4 vH. und die lebendige Kraft auf 3,4 vH. herabgesetzt wird. Der beabsichtigte Zweck dürfte damit wohl sicher in ausreichender Weise erzielt sein.

Versuchsweise wurde, wie in Text-Abb. 77 durch Strichelung angedeutet, eine Abdeckung des Beruhigungskastens durch ein Brett über der Treppe vorgenommen. Wird das Brett zu niedrig angebracht, so kann es schädlich wirken; in geeigneter Höhe aber und mit der in der Abbildung erkenntlichen Leiste nebst Querbrett am Ende versehen, gewährt es den Vorteil, daß dadurch die Bildung des Wassersprunges vor den Sohlenleisten begünstigt wird, so daß diese der Treppe etwas nähergerückt werden dürfen, wie die gestrichelte Wasserspiegellinie zeigt. Bezüglich der praktischen Ausführung der besprochenen Anordnung im großen ist zu beachten, daß die Treppe sehr großen Stoßkräften ausgesetzt ist, also aus ganz besonders widerstandsfähigem Baustoff gebildet werden muß. Da überdies Erschütterungen zu erwarten sind, so ist eine äußerst innige, feste Verbindung aller Teile zu einem einheitlichen Ganzen von großer Wichtigkeit. Anderseits besteht ein großer Vorteil der Anlage darin, daß die Hauptvernichtungsarbeit der lebendigen Kraft des Wassers durch innere Wirbelbewegungen im Wasser selbst erfolgt und nur zum kleinen Teil durch Stöße, welche das Bauwerk angreifen. Zudem ist der Bauteil, welcher die Stöße erhält, so klein, daß er ohne große Kosten aus vorzüglichem Stoff, z. B. bestem Granit, hergestellt werden kann, was ganz besonders bei der Treppe geboten erscheint, da die Stufen sich sonst leicht mit der Zeit abschleifen dürften.

Die sämtlichen vorstehend (vgl. auch S. 663 vor. Jahrg.) besprochenen Versuche wurden im Herbst 1907 durch Reg.- und Baurat Thiele und Reg.-Baumeister Herbst begonnen, vom 1. April 1908 ab durch den Verfasser zunächst in Gemeinschaft mit Reg.-Rat Thiele, dann nach dessen im August 1909 erfolgten Tode allein fortgesetzt und gegen Anfang des Jahres 1911 zum Abschluß gebracht, worauf dann die weitere Verarbeitung und Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgte. Die Einrichtung der Talsperren-Versuchsanlage stammt in der Hauptsache von Herrn Reg.- und Baurat Thiele, die Anlage für die Grundablaßversuche und gewisse Einzelheiten bei den Talsperrenversuchen vom Verfasser. Hierzu gehört insbesondere die Erhöhung der Wasserpolsterwirkung durch treppenartig ansteigende Sohle und durch Anbringung einer kleinen abgetreppten Sohlenleiste, ebenso die weitere Ausgestaltung der Versuchsanlage für die Warmbrunner Talsperre. Auch die mitgeteilten theoretischen Erklärungen der beobachteten Erscheinungen rühren vom Verfassser her.

Können die Versuchsergebnisse bei der Kleinheit des Maßstabes auch nicht bis ins einzelne als unbedingt zuverlässige Richtschnur für Ausführungen im großen gelten, so dürften sie doch in vielen Fällen wichtige Anhaltspunkte bieten und in mancher Beziehung dazu dienen können, etwas zu der so dringend notwendigen Klärung unserer Kenntnisse und Anschauungen über das Verhalten des Wassers beim Ausfluß und Ablauf unter verschiedenen Umständen beizutragen.

Betriebseinrichtungen des Großschiffahrtweges Berlin—Stettin

(Wasserstraße Berlin—Hohensaathen).

(Schluß aus Jahrgang 1913.)

Von Max Buchholz, Regierungsbaumeister, Groß-Plehnendorf bei Danzig.

(Mit Abbildungen auf Blatt 19 bis 22 im Atlas.)

Elektrische Ausrüstung.

Während die gesamten Maschineneinrichtungen der Schleusen Lehnitz und Niederfinow elektrisch ausgerüstet sind, besitzen bei den Schleusen Plötzensee und Spandau nur die Klapptore und Spille maschinellen Antrieb, der durch Drehstrommotoren von 220 Volt Spannung bei 50 Polwechsel in der Sekunde erfolgt. Sie erhalten den Strom aus dem Netz des Berliner bzw. Spandauer Elektrizitätswerks.

Schleuse Lehnitz.

Die Schleuse Lehnitz, für die der erforderliche Strom in eigener Kraftanlage erzeugt wird, wird mit Gleichstrom betrieben. Zum Antrieb der Windwerke für die Tore und Umlaufverschlüsse sind Nebenschlußmotoren und für den Antrieb der Spille Hauptstrommotoren zur Anwendung gekommen. Sämtliche Motoren besitzen ein vollkommen geschlossenes Gehäuse, welches die Wicklungen gegen mechanische Verletzungen, sowie gegen Staub und Feuchtigkeit schützt.

Es wurden gewählt: für die Stemmtore und für das Klapptor Motoren von je 7 PS bei rd. 1170 Umdr./Min. (Öffnen gegen 10 cm Wasserspiegelunterschied), für die Segmentschütze Motoren von je 2,4 PS bei 1340 Umdr./Min., für die Zylinderventile Motoren von je 1,5 PS bei 810 Umdr./Min. und für die beiden Spille Motoren von je 5,5 PS bei 1240 Umdr./Min.

Die Schaltung der elektrischen Antriebe zeigt die Text-Abb. 21. Um die Schleusenkammer ist die Hauptspeiseleitung

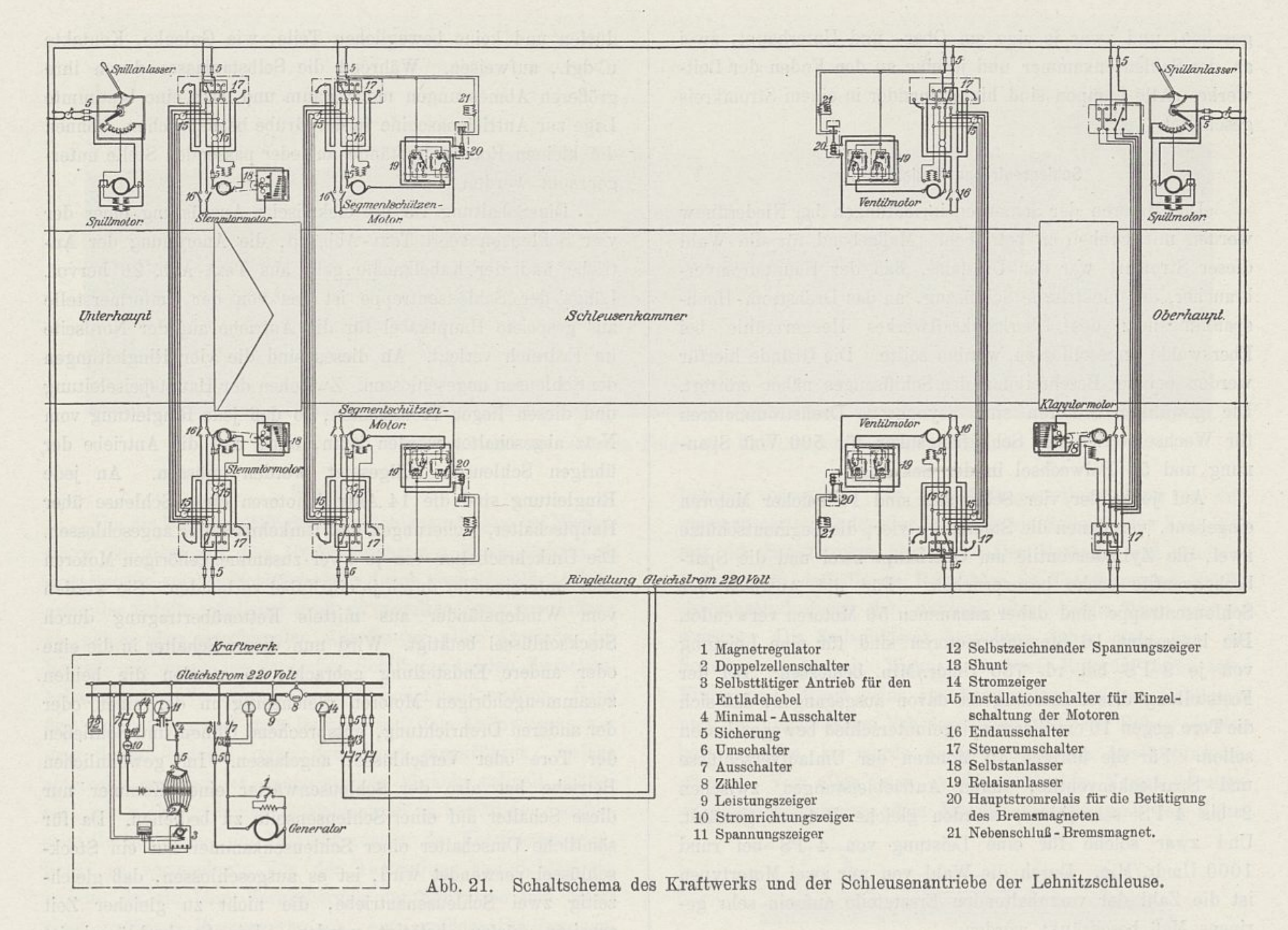


Abb. 21. Schaltschema des Kraftwerks und der Schleusenantriebe der Lehnitzschleuse.

als Ringleitung verlegt. An diese Ringleitung sind die einzelnen Schleusenmotoren über die erforderlichen Sicherungen und Steuerschalter angeschlossen. Die Steuerschalter von je zwei zusammengehörigen Motoren sind untereinander durch Kabel verbunden und gestatten die Umkehr der Drehrichtung der Motoren. Wird einer dieser Schalter in die eine oder andere Schaltstellung eingelegt, so werden beide Motoren gleichzeitig durch die Selbstanlasser in der einen oder anderen Drehrichtung gesteuert. Um ein zu starkes Nachlaufen der Windwerke zu verhindern, ist bei jedem Antrieb ein Magnet eingebaut, der die Bremse während des Betriebes lüftet und sie sofort wieder einfallen läßt, sobald der Strom unterbrochen wird. Weiterhin sind für jeden Motor zwei Endausschalter vorgesehen, die den Motor- und Bremsmagnetstromkreis unterbrechen, sobald der betreffende Antrieb beim Öffnen oder Schließen seine Endstellung erreicht hat. Als Hauptverbindungsleitungen sind längs der Schleusenkammer und in den Kanälen auf dem Schleusenmauerwerk Kabel verlegt. Für die Durchführung der Leitungen durch die Schleusenkammer sind Flußkabel, die einen besonders schweren Eisenbandschutz besitzen, zur Anwendung gekommen.

Kraftwerk. Der für den Antrieb der Bewegungseinrichtungen der Lehnitzschleuse erforderliche elektrische Strom wird als Gleichstrom von 220 Volt in einem am östlichen Flügel des Unterhauptes errichteten Wasserkraftwerk erzeugt (Abb. 8 bis 10 Bl. 19 u. Text-Abb. 22). Der Antrieb des Gleichstromerzeugers erfolgt durch unmittelbare Kupplung mit einer regelbaren Francis-Turbine der Firma Briegleb, Hansen u. Ko., Gotha. Die Turbine kann bei einem wirksamen Gefälle von 4,6 m und bei einer Wassermenge von 490 l in der Sekunde eine Dauerleistung von 24 PSe bei 320 Umdr./Min. abgeben. Die Regelung der Umdrehungszahl der Turbine erfolgt durch einen Öldruckregler, welcher auf die Verstellung der Leitschaufeln wirkt. Das Betriebswasser wird durch ein Rohr von 900 mm l. W. vom Oberhaupt zugeführt. Vor der Turbinenkammer ist in dem Zuführungsrohr ein von Hand zu betätigendes Schütz eingebaut. Der Maschinenraum liegt im Keller des Maschinenhauses. Hier ist auch die Schalttafel aufgestellt, welche alle erforderlichen Apparate für die Kraftanlage und auch die Schalter und Sicherungen für die Beleuchtung enthält. In den beiden Stockwerken über dem Maschinenraum ist eine Sammlerbatterie mit 120 Elementen untergebracht, die eine Ladefähigkeit von 180 Ampere-Stunden bei fünfstündiger Entladung besitzt. Die Glasgefäße der Elemente sind so bemessen, daß durch Hinzufügen neuer Platten die Batterie auf eine Ladefähigkeit von 300 Ampere-Stunden bei fünfstündiger Entladung ausgebaut werden kann, so daß sie für den Betrieb der später zu erbauenden zweiten Schleuse ausreicht. Die Leistung der Turbine und des Stromerzeugers ist ebenfalls für den Kraftbedarf der zwei Schleusen bemessen. Der Stromverbrauch für eine Doppelschleusung errechnet sich zu 1,6 KW.-Std. — Für die Außenbeleuchtung sind sechs Bogenlampen vor-

gesehen, und zwar je eine am Ober- und Unterhaupt, zwei an der Schleusenkammer und je eine an den Enden der Leitwerke. Alle Lampen sind hintereinander in einem Stromkreis geschaltet.

Schleusentreppe Niederfinow.

Die Motoren der Schleuseneinrichtungen bei Niederfinow werden mit Drehstrom betrieben. Maßgebend für die Wahl dieser Stromart war der Umstand, daß der Hauptstromverbraucher, der elektrische Schiffszug, an das Drehstrom-Hochspannungsnetz des Überlandkraftwerkes Heegermühle bei Eberswalde angeschlossen werden sollte. Die Gründe hierfür werden bei der Beschreibung des Schiffszuges näher erörtert. Die gewählten Motoren sind asynchrone Drehstrommotoren für Wechselbetrieb mit Schleifringanker für 500 Volt Spannung und 50 Polwechsel in der Sekunde.

Auf jeder der vier Schleusen sind 14 solcher Motoren eingebaut, von denen die Stemmtore vier, die Segmentschütze zwei, die Zylinderventile am Oberhaupt zwei und die Sparbeckenventile sechs beanspruchen. Für die Antriebe der Schleusentreppe sind daher zusammen 56 Motoren verwendet. Die insgesamt 16 Stemmtormotoren sind für eine Leistung von je 9 PS bei rd. 750 Umdr./Min. bemessen. Bei der Feststellung dieser Leistung ist davon ausgegangen, daß sich die Tore gegen 10 cm Wasserspiegelunterschied bewegen lassen sollen. Für die übrigen 40 Motoren der Umlaufverschlüsse und Sparbeckenventile, deren Antriebleistungen zwischen 2 bis 4 PS schwanken, wurden gleiche Motoren gewählt. Und zwar solche für eine Leistung von 4 PS bei rund 1000 Umdr./Min. Durch die Wahl von nur zwei Motortypen ist die Zahl der vorzuhaltenden Ersatzteile auf ein sehr geringes Maß beschränkt worden.

Die Motoren besitzen ebenfalls vollkommen geschlossene Gehäuse. Die Schleifringe und Bürsten sind nach Öffnen besonderer Verschlußklappen leicht zugänglich (Text-Abb. 23). Das Gehäuse ist in der wagerechten Mittelebene geteilt. Die Teilung erstreckt sich auch auf die Lager, so daß der Oberteil ohne weitere Handhabungen abgenommen werden kann und der Ständer, Läufer und die Lagerschalen mit ihrer Schmiervorrichtung freigelegt werden. Selbst bei umfangreichen Arbeiten, z. B. beim Auswechseln eines Ankers, braucht daher der Motor nicht von der Lagerplatte entfernt oder die Kupplung abgekeilt zu werden. Neben einer einfachen Wartung besitzen die Motoren durch diese Einrichtungen eine große Betriebssicherheit.

Das Anlassen sämtlicher Motoren erfolgt unter Verwendung fester Läuferwiderstände, die auch während des Betriebes eingeschaltet bleiben. Die Umlaufzahl der Motoren und deren Wirkungsgrad sinken dabei dauernd um etwa 15 bis 20 vH., während bei Verwendung von Selbstanlassern diese Verluste nur während der Anlaßzeit auftreten. Der Mehrbedarf an Strom durch diese Widerstände ist bei den verhältnismäßig geringen Motorleistungen und kurzen Betriebszeiten aller Motoren im Vergleich zu dem Verbrauch für die übrigen elektrischen Anlagen der Schleusentreppe jedoch sehr gering. Er beträgt bei einer Doppelschleusung für die Motoren einer Schleuse rd. 0,15 KW.-Std. Die Anordnung von Läuferwiderständen hat dagegen die Vorzüge großer Betriebssicherheit und Billigkeit, da sie keiner Wartung bedürfen und keine beweglichen Teile, wie Gelenke, Kontakte u. dgl., aufweisen. Während die Selbstanlasser durch ihre größeren Abmessungen mehr Raum und dazu eine bestimmte Lage zur Antriebmaschine in der Grube beanspruchen, können die kleinen Rotorwiderstände an jeder passenden Stelle untergebracht werden.

Die Schaltung für die elektrische Ausrüstung einer der vier Schleusen zeigt Text-Abb. 25, die Anordnung der Antriebe und der Kabelkanäle geht aus Text-Abb. 26 hervor. Längs der Schleusentreppe ist das von der Umformerstelle aus gespeiste Hauptkabel für die Antriebe auf der Nordseite im Erdreich verlegt. An dieses sind die vier Ringleitungen der Schleusen angeschlossen. Zwischen der Hauptspeiseleitung und diesen liegen Trennkästen, so daß jede Ringleitung vom Netz abgeschaltet werden kann, ohne daß die Antriebe der übrigen Schleusen stillgesetzt werden müssen. An jede Ringleitung sind die 14 Antriebmotoren einer Schleuse über Hauptschalter, Sicherungen und Umkehrschalter angeschlossen. Die Umkehrschalter von je zwei zusammengehörigen Motoren sind untereinander durch je ein Kabel verbunden. Sie werden vom Windenständer aus mittels Kettenübertragung durch Steckschlüssel betätigt. Wird nun dieser Schalter in die eine oder andere Endstellung gebracht, so werden die beiden zusammengehörigen Motoren gleichzeitig in der einen oder der anderen Drehrichtung, entsprechend Öffnen und Schließen der Tore oder Verschlüsse, angelassen. Im gewöhnlichen Betriebe hat also der Schleusenwärter einer Kammer nur diese Schalter auf einer Schleusenseite zu bedienen. Da für sämtliche Umschalter einer Schleusenkammer nur ein Steckschlüssel verwendet wird, ist es ausgeschlossen, daß gleichzeitig zwei Schleusenantriebe, die nicht zu gleicher Zeit arbeiten dürfen, betätigt werden. Der Steckschlüssel ist außerdem so hergestellt, daß er nur in der Ausschaltstellung abgezogen werden kann. Alle Schalter befinden sich daher vor jeder Schaltung in der Mittelstellung und verhüten Kurzschlüsse. Für jeden Motor sind weiterhin zwei zweipolige Moment-Endausschalter vorgesehen, die den Motorstromkreis unterbrechen, sobald das Tor oder der Verschluß beim Öffnen oder Schließen seine Endstellung erreicht hat. Während also das Anlassen der Motoren mittels des Steckschlüssels von Hand aus erfolgt, wird die weitere Steuerung des betreffenden Motors durch das Windwerk selbst besorgt. Durch das Zusammenarbeiten der fünfpoligen Umkehrschalter mit den zweipoligen Endausschaltern wird eine große Betriebssicherheit gewährleistet, da die Antriebbewegungen in jedem Augenblick unterbrochen und im umgekehrten Sinne weitergeführt werden können. Um ein Nachlaufen der Windwerke zu verhindern, ist für jedes noch ein Motorbremsmagnet vorgesehen.

Die gesamte zu einem Antriebe gehörige elektrische Ausrüstung hat in seiner Antriebgrube Platz gefunden. Alle Leitungen sind als Kabelleitungen ausgeführt. Soweit diese im Erdboden oder in den gemauerten Kanälen der Kammer liegen, sind Bleikabel mit Eisenbandumhüllung, an den Schleusenhäuptern für die Durchführung der verschiedenen Leitungen durch die Kammern selbst Flußkabel, d. h. asphaltierte Bleikabel mit Eisenbandschutz, verwendet worden. Die durch die Kammern geführten Flußkabel sind an den Seitenwänden in verkleideten Kabelnischen heruntergeführt und befestigt.



Abb. 22. Wasserkraftwerk am östlichen Flügel des Unterhauptes der Lehnitzschleuse.

Schiffszug.

Um die Leistungsfähigkeit der Schleusentreppe bei Niederfinow bei dem auf dem Großschiffahrtweg Berlin-Stettin zu erwartenden starken Schiffsverkehr durch eine schnelle Abfertigung der Schiffe möglichst groß zu gestalten, war von Anfang an neben der maschinellen Ausrüstung aller Antriebe der Betrieb mit einem mechanischen Schiffszug in den Zwischenhaltungen und Vorhäfen in Aussicht genommen worden. Nach den Erfahrungen bei dem Betriebe auf dem Teltowkanal war man darauf bedacht, eine Betriebsart einzuführen, welche einerseits geeignet ist, einen starken Verkehr schnell, sicher und mit nicht zu hohen Betriebskosten zu bewältigen, anderseits Gefährdungen und Beschädigungen des Kanalbettes möglichst zu vermeiden. Von der Anwendung von Schleppern wurde, da sie eine Vergrößerung der Schleusen und damit einen größeren Wasserverbrauch, eine größere Schleusungszeit und höhere Baukosten erfordert hätten, abgesehen.

Die aufgestellten Entwürfe lösten die Aufgabe durch Seiltriebe oder Zugeinrichtungen vom Ufer aus. Von den ersteren verdient wegen seiner Einfachheit der in Text-Abb. 24 angegebene hervorgehoben zu werden. Das Seil ist hierbei endlos über zwei Scheiben mit wagerechten Achsen geführt, die in den Mitten der eine Haltung begrenzenden Häupter so gelagert sind, daß die Schiffe frei darunter wegfahren können. In den Vorhäfen war in ihrer Mitte ein besonderer Pfeiler zur Lagerung der zweiten Scheibe angeordnet. Die angetriebene Scheibe war als Koepe-Scheibe mit reiner Reibungswirkung oder als Trommel wie im Fördermaschinenbetrieb vorgesehen. In der Anfangsstellung hing an entgegengesetzten Enden der Trume je ein Seilende zur Kupplung mit der Schiffstrosse herunter. Der Verkehr war pendelnd gedacht, so daß die zu Berg oder zu Tal fahrenden Schiffe abwechselnd durch den unteren oder oberen Trum gezogen wurden. Die Seilschlösser brauchten daher nicht über die Scheiben zu treiben. Wenn auch dieser Entwurf durch seine Einfachheit, durch seine verhältnismäßig geringen Baukosten und die gleichmäßige Fahrgeschwindigkeit der Kähne vorteilhaft erschien, so wurde er doch nicht zur Ausführung bestimmt. Vor allen war es die schlechte Verständigungsmöglichkeit zwischen dem Maschinenwärter und den Kahnführern und die geringe Übersicht des ersteren, besonders bei nebligem Wetter, die zu Bedenken Veranlassung gaben. Dazu kam der Mangel an Erfahrung mit Seiltrieben für diesen Sonderfall.



Abb. 24. Schiffszug mit Seilbetrieb.

Zur Ausführung bestimmt wurde daher ein Zug vom Ufer aus und zwar der Schiffszug mittels elektrischer Lokomotiven. Maßgebend für diesen Beschluß waren in erster Linie die günstigen Erfolge mit dieser Schleppart am Teltowkanal und die bis auf das Jahr 1898 zurückreichenden ausdauernden Versuche, die von vornherein einen sicheren Betrieb gewährleisteten. Für die Leistung und Geschwindigkeit der Schleppmittel waren folgende Überlegungen maßgebend. Nach den Erfahrungen im Schiffahrtsbetrieb war als höchste Geschwindigkeit für zwei sich in einer Zwischenhaltung kreuzende 600 t Schiffe 0,8 m/Sek. als noch zulässig erachtet worden. Für diese Geschwindigkeit ist bei einem vollbeladenen 600 t Kahn auf freier Strecke des Großschiffahrtweges nach angestellten Schleppversuchen mit solchen Kähnen eine Zugkraft von rd.

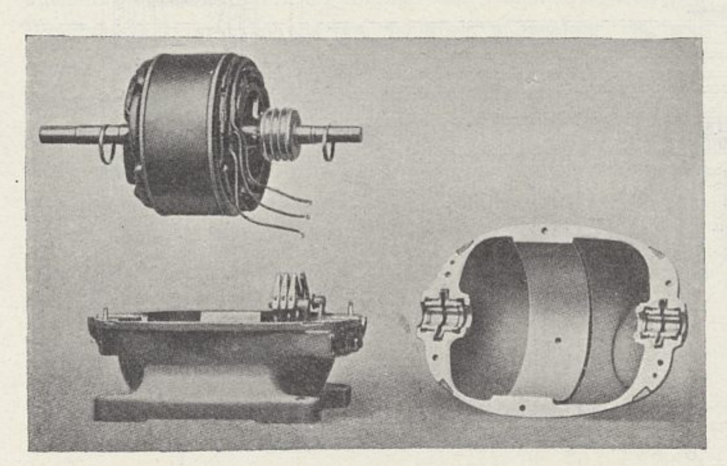


Abb. 23. Drehstrommotor für den Antrieb der Schleusen Niederfinow.

Abb. 25. Schaltungsschema der Antriebe einer Schleusenkammer Niederfinow.

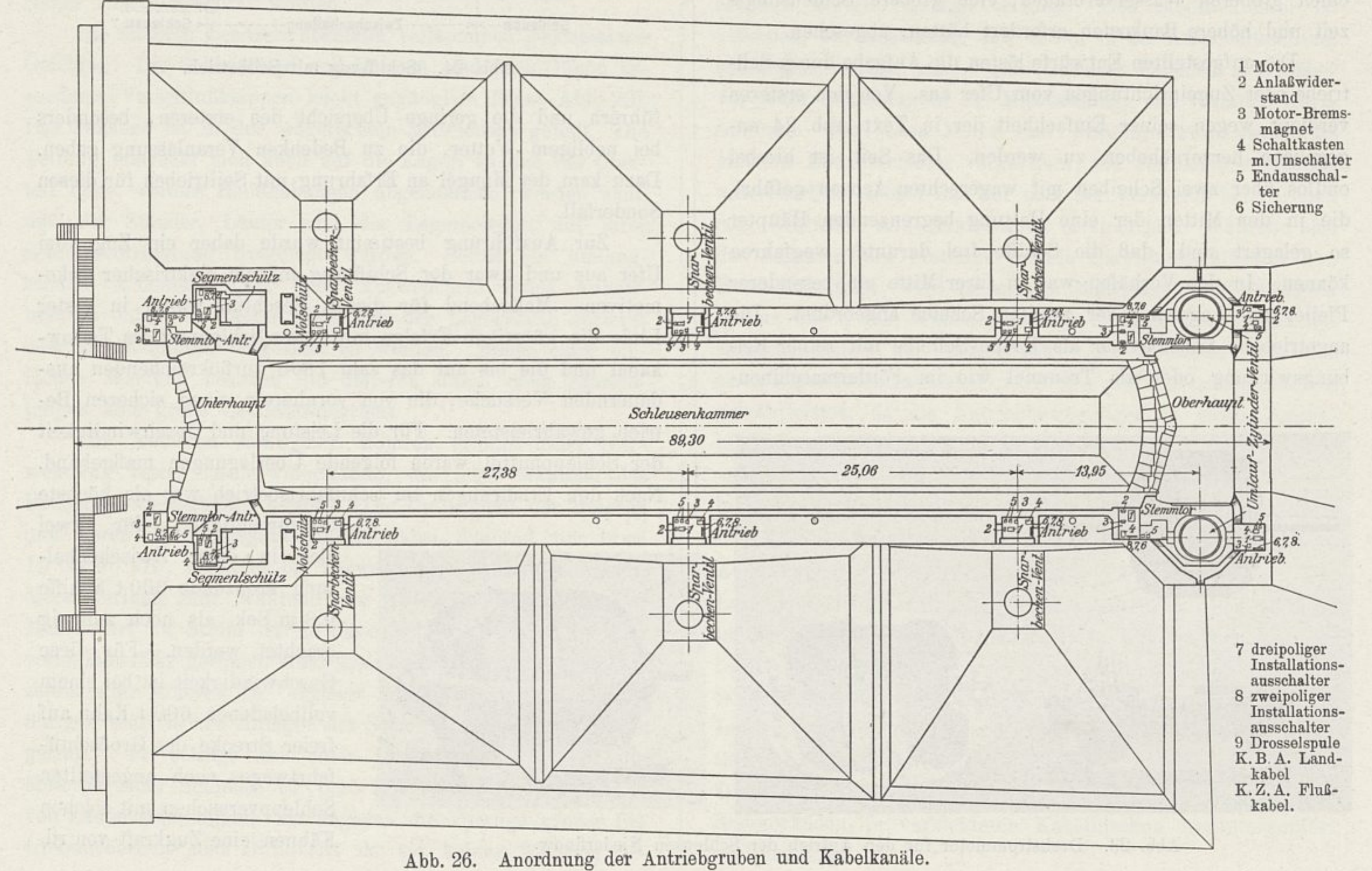


Abb. 26. Anordnung der Antriebgruben und Kabelkanäle.

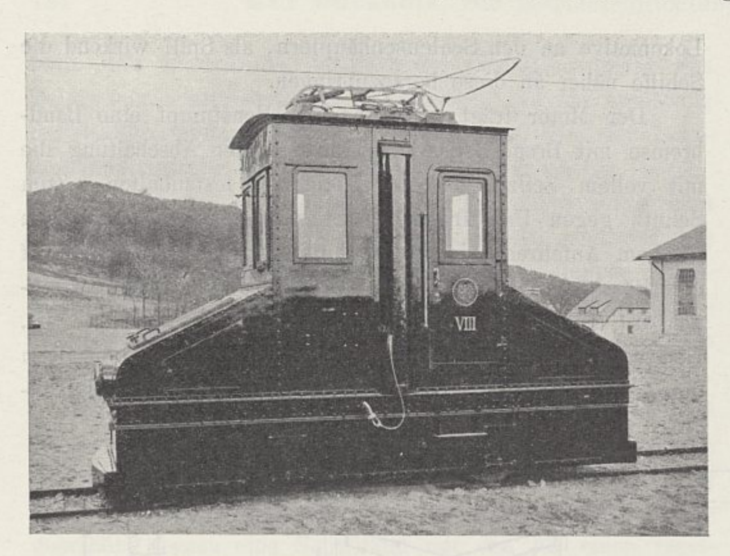


Abb. 27. Schlepplokomotive, von der Kanalseite aus gesehen.

350 kg erforderlich. Es wurde jedoch auf Grund von Berechnungen und Versuchen an anderen Schleusenanlagen mit Rücksicht auf die bedeutenden Widerstandsvergrößerungen beim Heranschleppen der Fahrzeuge aus den Schleusenkammern und beim Begegnen innerhalb der Haltungen eine Zugkraft von gewöhnlich 600 bis 1200 kg festgesetzt. Hierfür wurden zwei Motoren auf den Triebachsen von je 4,5 PS normaler Stundenleistung gewählt, die imstande sind, die für die Ausübung der höchsten Zugkraft von 1200 kg erforderliche Leistung bei dem Schleppbetrieb, und vorübergehend eine Zugkraft von 1500 kg ohne Überlastung herzugeben. Anderseits genügen die Maschinen für eine solche Leerfahrtgeschwindigkeit, daß sie für ein eben abgefertigtes Schiff in den Zwischenhaltungen und Vorhäfen für den weiteren Schleppbetrieb rechtzeitig zur Verfügung stehen. Hierfür müssen die Lokomotiven die Leerfahrten, also auch die zu Berg, bei der vorhandenen Steigung von rd. 1 : 30 mit einer Mindestgeschwindigkeit von rd. 2,5 m/Sek. (rd. 9 km/Std.) ausführen können. Bei der Festsetzung dieser Geschwindigkeit ist berücksichtigt worden, daß die Lokomotiven vor Beginn jedes Schleppdienstes eine Ruhepause von etwa 20 Minuten haben, damit dem Führer zum Nachsehen und Vorbereiten für den weiteren Dienst die erforderliche Zeit zur Verfügung steht.

Für den Lokomotivbetrieb kamen Drehstrom, Gleichstrom oder Einphasenstrom in Betracht. Von der Verwendung von Drehstrom wurde wegen der Unübersichtlichkeit und Betriebsunsicherheit der Oberleitung infolge der vielen erforderlichen Weichen und ihrer schwierigen Isolation abgesehen. Es war zuerst beabsichtigt, ein Gleichstrom-Kraftwerk mit Sammler-Pufferbatterie, zum Ausgleich unregelmäßigen Stromverbrauchs, zu errichten. Die angestellten Anlage- und Betriebskostenberechnungen ergaben jedoch, daß eine Stromentnahme aus dem Hochspannungsnetz des Überlandkraftwerkes Heegermühle bei Eberswalde sich wirtschaftlicher gestaltete, als die Erzeugung des Stromes in einer eigenen Kraftanlage. Es wurde daher bestimmt, daß der Strom aus diesem Überlandnetz genommen werden sollte.

Bei Verwendung von Gleichstrom für den Lokomotivbetrieb wären dann neben den Transformatoren noch Umformer-Maschinen und eine Pufferbatterie erforderlich gewesen, die die Beschaffungskosten, Wartung und Betriebskosten, vor allem durch die hohen Stromverluste, vergrößert hätten. Da diese immerhin umfangreichen Anlagen bei Verwendung von Einphasenstrom zum größten Teil in Fortfall kommen, und die Motoren die gleichen günstigen Betriebsverhältnisse wie die Gleichstrommotoren besitzen, dabei aber noch den Vorteil weitgehender verlustloser Geschwindigkeitsregelbarkeit aufweisen, wurde diese Stromart zum Betrieb der Lokomotiven gewählt. Auf die Entnahme des Einphasenstromes aus dem Drehstromnetz ist bei der Beschreibung der Umformstelle näher eingegangen.

Lokomotiven. Die Konstruktion der Schlepplokomotiven geht aus den Abb. 4 bis 6 Bl. 20, die äußere Formgebung derselben, von der Wasserseite aus gesehen, aus der Text-Abb. 27 hervor.

Jede der unter sich gleichartig ausgeführten Lokomotiven von rd. 12 t Dienstgewicht besitzt zwei Achsen, die zur vollen Ausnutzung der Reibung durch je einen Motor mit doppeltem Vorgelege angetrieben werden. Die Motoren haben eine gewöhnliche Stundenleistung von je 4,5 PS bei 500 Umdr./Min. und sind für 500 Volt Spannung ausgeführt. Jeder Motor ist auf einer Grundplatte aufgebaut, die sich auf der einen Seite mit den Traglagern auf eine Treibachse stützt, während die andere Seite am U-Eisenrahmen der Maschine federnd aufgehängt ist. Gewählt sind Einphasen-Repulsionsmotoren, die unter den Wechselstrom-Kommutatormotoren dadurch eine besondere Stellung einnehmen, daß dem umlaufenden Teil kein Strom von außen zugeführt wird. Die Verstellung der Bürsten, durch die allein die Umsteuerung und Geschwindigkeit geregelt wird, kann daher trotz der verhältnismäßig hohen Spannung während des Betriebs völlig gefahrlos ausgeführt werden. Das Anlassen und Anfahren erfolgt in einfacher Weise dadurch, daß die Bürsten aus der Nullstellung, die dem Stillstand entspricht, verschoben werden. Von der Richtung der Bürstenverschiebung ist die Motordrehrichtung abhängig.

Da die Lokomotiven bei Lastfahrt nur Krümmungen von wenigstens 200 m Halbmesser zu durchfahren haben, sind keine Drehgestelle zur Anwendung gekommen. Durch geeignete Ausbildung der Radkränze und Verlegung der Gleise kann die Lokomotive jedoch trotz des Radstandes von 2 m bei Leerfahrt die Gleiskrümmungen an der Brücke, die nur 15 m Halbmesser haben, ohne Schwierigkeit durchfahren. Um am Ufer liegende Kähne gegebenenfalls überholen zu können, mußte der Angriffspunkt der Seiltrossen an der Lokomotive in der Höhe zwischen 1,5 bis 2,8 m über Schienenoberkante verstellbar eingerichtet werden. Da nach den baulichen Anlagen die Höhe der Lokomotive und damit die Höhe des Seilangriffpunktes keinen einschränkenden Bedingungen unterlag, brauchte bei der konstruktiven Lösung kein niederlegbarer Treidelmast, wie z. B. bei den Maschinen am Teltowkanal, gewählt werden. Es genügte eine einfache Vorrichtung, bei der ein durch Handrad vom Führerstand aus senkrecht zu bewegender Laufwagen mit Seilrolle die Höhe des Angriffspunktes verstellt. Die an einer Seite in der Mitte der Lokomotive am Führerhaus befindlichen Laufschienen desselben sind als eine auf Kugellagern drehbare Säule ausgebildet. Durch die gewählte Lage und durch die bewegliche Seilführung ist erreicht, daß sich der durch den schrägen Zug hervorgerufene Spurkranzdruck auf die wasserseitige Schiene

gleichmäßig auf beide Achsen verteilt, und die Seilrolle sich stets der jeweiligen Zugrichtung anpaßt. Die Lokomotive ist deshalb nach beiden Fahrtrichtungen symmetrisch gebaut. Senkrecht zu dieser Richtung besitzt sie jedoch Mehrlast nach der Landseite hin. Das Zugseil läuft vom Schiff kommend über die Rolle im Wagen durch die Mitte des Kugelstützlagers über eine Führungsrolle zur Seiltrommel. Diese wird von einem besonderen Motor mit doppeltem Vorgelege angetrieben. Die Leistung und Art des Motors entspricht der der Fahrmotoren und reicht aus, während des Schleppens die Trosse unter Zug zu kürzen, oder, nach Stillstand der Lokomotive an den Schleusenhäuptern, als Spill wirkend die Schiffe näher an diese heranzubringen.

Der Motor trägt auf seinem Wellenstumpf eine Bandbremse mit Bremsmagnet, um nach seiner Abschaltung die mit vollem Seilzug belastete Trommel festzuhalten. Zum Schutz gegen Umstürzen bei Überlastungen, z. B. bei zu raschem Anfahren oder beim Auffahren eines Kahnes auf eine Böschung, ist in die Trommel eine Rutschkupplung eingebaut, die auf den höchst zulässigen Zug eingestellt ist. Erst nach Überschreiten dieses Zuges wirkt sie und läßt dann die Zugtrosse solange ablaufen, als der zu starke Zug an-

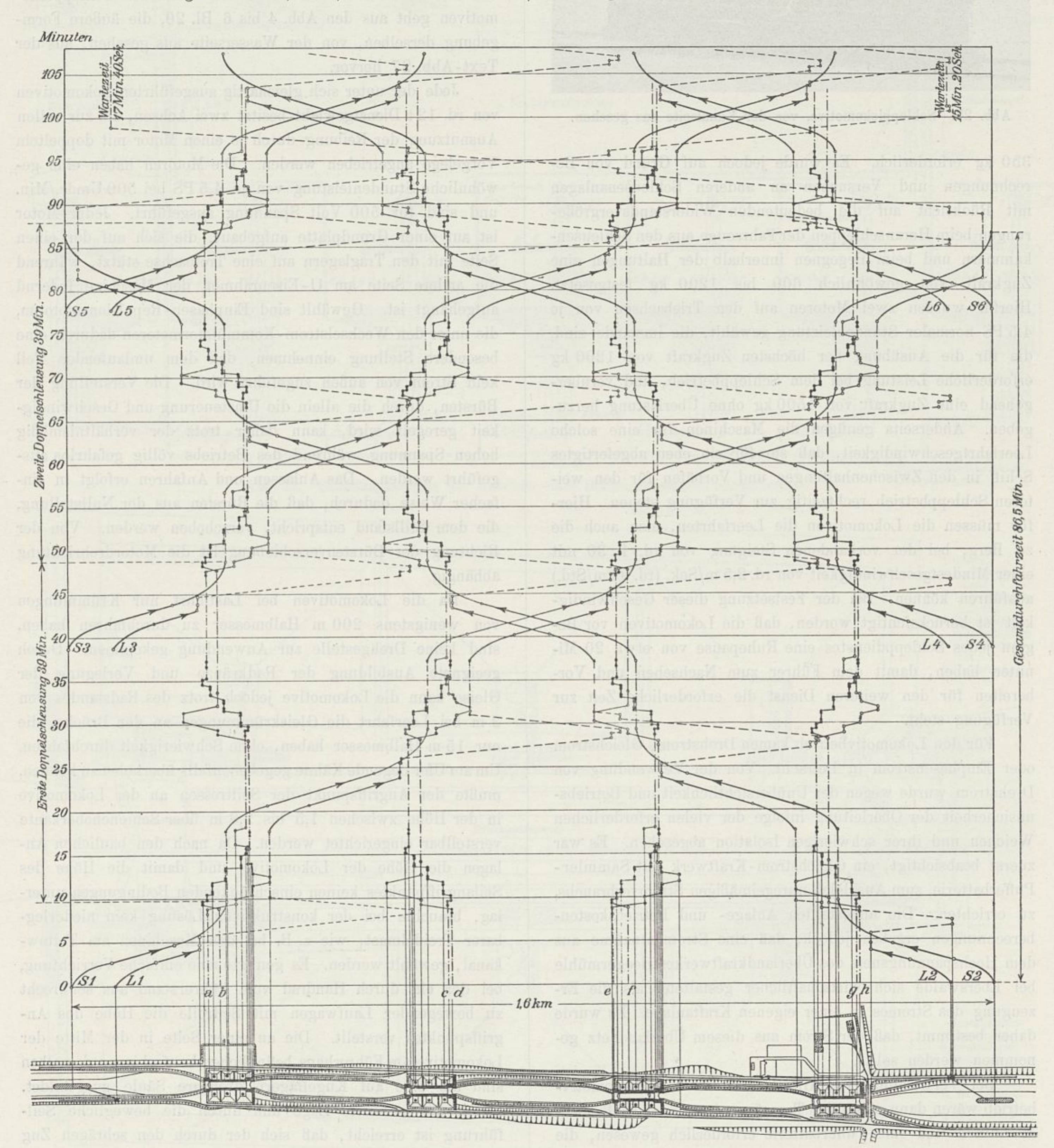


Abb. 28. Fahr- und Betriebsplan für den Schiffszug und die Betriebseinrichtungen der Schleusentreppe bei Niederfinow.

hält. Die Einrichtung hat sich bei den Lokomotiven des Teltowkanals sehr bewährt und gezeigt, daß die Auslösung der Rutschkupplung trotz jahrelangen Betriebes der Lokomotiven ungefähr bei der gleichen Zugkraft eintritt.

Da das Seil bei einer Länge von rd. 100 m in mehreren Lagen auf die Trommel aufgewickelt werden muß, ist eine Spulvorrichtung eingebaut, so daß sich die Windungen gleichmäßig nebeneinander legen. Ein durch Federkraft angedrückter Klotz verhütet, daß sich die nicht unter Zug stehenden Seilwindungen lockern.

Die Maschine ist noch mit einer auf beiden Achsen wirkenden Handbremse und mit Sandstreuern ausgerüstet. Sämtliche Handgriffe für die Fahr- und Wickelmotoren, für den Seilwagen und für die Bremse sind im Führerhaus untergebracht; ebenso eine Schalttafel mit den für einen regelrechten Betrieb erforderlichen Meßapparaten. An den beiden Stirnseiten der Maschine sind Pufferbohlen mit Zugösen angebaut. Die Lokomotive wird durch Glühlampen beleuchtet.

Zur Stromabnahme von der Fahrleitung, die mit Rücksicht auf den Verkehr der Brücke 5 m hoch liegt, dient ein Bügel, der sich bei Umkehr der Fahrrichtung selbsttätig umlegt. Zur Verständigung der Maschinisten untereinander oder mit den Kahnführern ist jede Lokomotive mit einer elektrischen Hupe ausgerüstet. Warnungssignale können durch ein mit der Hand zu bedienendes Glockenzeichen gegeben werden.

Bei der Wahl der Baustoffe und ihrer Beanspruchungen, bei der konstruktiven Durchbildung der Einzelteile, insbesondere der Lager, der Schmier- und Staubschutzvorrichtungen haben nach jeder Richtung hin der Verwendungszweck und die örtlichen Verhältnisse Berücksichtigung gefunden. Ebenso ist dafür gesorgt, daß alle zu bedienenden Teile leicht zugänglich sind.

Die Gleisanlage. Für den elektrischen Treidelbetrieb sind die Vorhäfen, Zwischenhaltungen und Kammern zu beiden Seiten der Schleusentreppe sowie die Brückenüberführung und die Einfahrt zum Lokomotivschuppen mit Gleisen ausgerüstet, deren Linienführung aus den Grundrissen auf den Fahr- und Betriebsplänen, auf die noch näher eingegangen wird, ersichtlich ist (Abb. 1 bis 3 Bl. 20 u. Text-Abb. 28).

Bei dem oben angegebenen Dienstgewicht der Lokomotiven von etwa 12 t tritt bei Ausübung einer Zugkraft von 1500 kg im ungünstigsten Belastungsfalle, d. h. bei höchster Stellung des in der drehbaren Säule laufenden Seilwagens, ein Raddruck von 2000 kg auf. Für diesen größten Raddruck ist ein Vignolschienengleis gewöhnlicher Bauart von 20 kg/m mit einer Spurweite von 1,0 m vorgesehen. Für die beiden Schienen des Gleises ist ein und derselbe Schienenquerschnitt gewählt worden, weil während der regelmäßigen Schlepparbeit der Lokomotiven infolge der unsymmetrischen Gewichtsverteilung beide Schienen annähernd gleich beansprucht werden. Das Gleis selbst ist auf kiefernen Holzschwellen mit einem Schwellenabstand von etwa 80 cm verlegt und durchweg mittels Schrauben und Klemmplatten auf diesen befestigt. Die Schwellen sind soweit unterstopft, daß die Kiesschüttung mit ihnen bündig abschließt. Der verwendete Kies, von dem etwa 600 cbm für 1 km Gleis gebraucht wurden, ist zum Teil dem Kanalbett selbst entnommen worden.

Auf der dem öffentlichen Verkehr dienenden festen Brücke unterhalb der Schleuse IV sind Rillenschienen verlegt worden, die auf der Brücke in ihrer ganzen Länge auf durchgehender Packlage gebettet und mit dem Straßenpflaster durch Beton verbunden sind.

Da die Gleise für die Rückleitung des elektrischen Stromes benutzt werden, sind die Schienenstöße durch platte Kupferbänder überbrückt, die zum Schutze gegen Diebstahl unter den Verbindungslaschen angebracht sind. Die Weichen sind ebenfalls von gewöhnlicher Bauart und mit einer Neigung des Herzstückes von 1 : 6 bei einem Zungenhalbmesser von 40 m ausgeführt. Die beiden Zungen jeder Weiche sind drehbar gelagert und können durch einen Stellbock von Hand umgelegt werden. Weichen und Straßenkreuzungen sind je nach ihrer Lage mit dem Querschnitt der auf der freien Strecke verwendeten Schienen oder mit dem der Rillenschienen hergestellt.

Die Oberleitungsanlage. Die links und rechts von der Schleusenanlage gelegene Strecke wird durch einphasigen Wechselstrom von 550 Volt gespeist. Die Fahrleitung ist für Bügelstromabnahmen eingerichtet und in der üblichen vom Straßenbahnbetriebe her bekannten gewöhnlichen Ausführungsart zur Verlegung gekommen (Abb. 1 Bl. 72 d. vor. Jahrg.).

Der Fahrdraht selbst besteht aus Hartkupferprofildraht von 65 qmm Querschnitt, während für die Speiseleitung von der Unterstation bis zu dem auf der festen Brücke liegenden Speisepunkt beider Fahrstrecken Kabel mit einem Kupferquerschnitt von 95 qmm zur Verlegung gekommen sind. Der Betriebsstrom fließt durch die Fahrschienen und einen doppelten Kupferleiter von 2 × 50 qmm Querschnitt zur Unterstation zurück. Die Fahrdrahthöhe wurde durchweg zu 5 m über Schienenoberkante gewählt, sowohl auf der freien Strecke, wie auf der festen Brücke unterhalb Schleuse IV. Das geschah ausschließlich mit Rücksicht auf den öffentlichen Verkehr auf dieser Brücke.

Die Gittermaste mit gebogenen Auslegern sind je nach ihrer Verwendungsart und Beanspruchung aus ⊔-Eisen oder Winkeleisen hergestellt. Die auf der Nordseite der Schleusentreppe befindlichen Maste werden gleichzeitig zur Befestigung der Freileitung für die Beleuchtungsstromkreise benutzt. Der Abstand zwischen je zwei Masten beträgt im allgemeinen auf gerader Strecke 35 m, während er sich in den Krümmungen und Weichen nach den Gleisverhältnissen richtet. Für die Aufhängungen in den Krümmungen sind Beidrähte

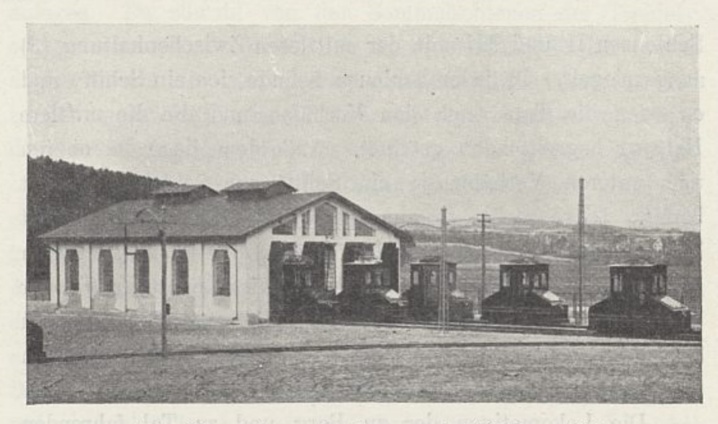


Abb. 29. Lokomotivschuppen bei Schleuse IV der Schleusentreppe Niederfinow.

vorgesehen, durch deren Anwendung die Lebensdauer des Fahrdrahtes wesentlich erhöht und die Abnutzung der Stromabnehmer-Schleifstücke auf ein Mindestmaß verringert wird.

Außer einem die ganze Fahrstrecke in zwei Teile zerlegenden Hauptgummiisolierstück auf der Brücke unterhalb Schleuse IV sind an den Schleusen I, II und III auf beiden Ufern noch Streckenunterbrecher mit je einem Ausschalter vorgesehen, wodurch die ganze Strecke in acht Abschnitte zerlegt wird. Durch den Einbau dieser Streckenunterbrecher ist man in den Stand gesetzt, bei etwaigen Betriebsstörungen nicht die ganze Strecke stromlos machen zu müssen. Gegen atmosphärische Entladungen sind die einzelnen Abschnitte der Oberleitung durch Höner-Blitzableiter geschützt, die auf einzelnen Masten angeordnet sind.

Für den Vollbetrieb an der Schleusentreppe sind für die Treidelei sechs Lokomotiven erforderlich. Außerdem sind zwei weitere als Ersatz gebaut und eingestellt worden. Zur Unterbringung dieser acht Lokomotiven ist in der Nähe von Schleuse IV ein Lokomotivschuppen erbaut (Text-Abb. 28 und 29). In diesem sind Stände für neun Maschinen auf drei nebeneinander gelegenen Gleissträngen vorgesehen. Der neunte Stand ist mit einer Gleisgrube ausgeführt.

Fahr- und Betriebspläne. Nachdem die Betriebseinrichtungen der Schleusen selbst und des elektrischen Schiffszuges beschrieben sind, sei im folgenden der eigentliche Betrieb an der Schleusentreppe näher erörtert.

Es sei davon ausgegangen, daß die Schleusen I und III auf Ober- und die Schleusen II und IV auf Unterwasser stehen (s. *a* in Text-Abb. 30). Die Schleusen I und IV sind dann mit dem oberen (1) und unteren Vorhafen (5) und die

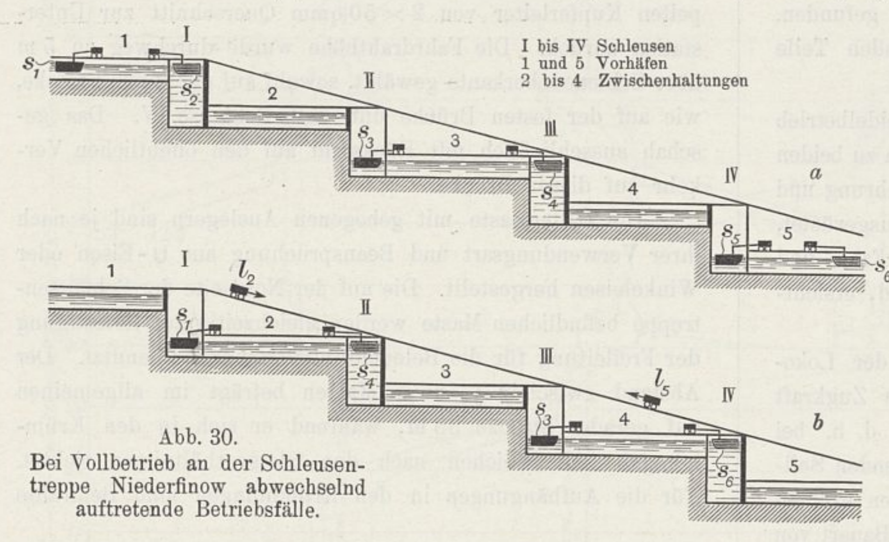


Abb. 30.
Bei Vollbetrieb an der Schleusentreppe Niederfinow abwechselnd auftretende Betriebsfälle.

Schleusen II und III mit der mittleren Zwischenhaltung (3) ausgespiegelt. In jeder Schleuse befinde sich ein Schiff, und es seien die Tore nach den Vorhäfen und die die mittlere Haltung begrenzenden geöffnet. Außerdem liege im oberen und unteren Vorhafen je ein Schiff zur Schleuseneinfahrt bereit. Diese sechs, je zur Hälfte auf Tal- und Bergfahrt begriffenen Fahrzeuge, werden nun von den Lokomotiven geschleppt, kreuzen sich in den Zwischenhaltungen oder Vorhäfen (1, 3 und 5) und fahren in die gegenüberliegenden Schleusen oder in die Vorhäfen. In den Zwischenhaltungen 2 und 4 ist während dieser Zeit kein Betrieb.

Die Lokomotiven der zu Berg und zu Tal fahrenden Schiffe schleppen auf verschiedenen Seiten der Ufer und zwar in der Fahrtrichtung gesehen stets auf der rechten. Die Schiffe werden nun geschleust und befinden sich in der in *b* in Text-Abb. 30 dargestellten Lage. Die Schleusen I und III sind dann auf Unter-, II und IV auf Oberwasser, d. h. die Schleusen I und II sind mit der Zwischenhaltung 2 und die Schleusen III und IV mit der Zwischenhaltung 4 ausgespiegelt. Der jetzt folgende Schleppbetrieb findet daher in diesen Zwischenhaltungen statt. Nach Beendigung desselben und nach der nächsten Schleusung ist der Betriebsfall nach *a* wiederhergestellt.

Bei vollem Verkehr an der Schleusentreppe wechseln also stets die beiden in *a* und *b* Text-Abb. 30 angegebenen Betriebsfälle. Es findet daher nach jeder Schleusung abwechselnd Schleppbetrieb in der Zwischenhaltung 3 und den Vorhäfen 1 und 5 oder aber in den Zwischenhaltungen 2 und 4 statt. Zur Abwicklung dieses Betriebes hätte eine Gleisanlage zu beiden Seiten der Vorhäfen und Zwischenhaltungen genügt. Dazu wären 10 Lokomotiven erforderlich gewesen. Es wurde jedoch längs der Schleusentreppe auf beiden Seiten noch je ein durchgehendes Gleis verlegt, welches mit den eigentlichen Betriebsgleisen durch Weichen in Verbindung steht. Hierdurch ist die Möglichkeit gegeben, den Betrieb so einzurichten, daß jede Lokomotive dasselbe Schiff durch die ganze Schleusentreppe bedient und nachher unter Benutzung des durchgehenden Gleises an den Anfang seiner Schleppstrecke zurückfährt. So fahren z. B. die Lokomotiven l_2 und l_5, die die Kähne s_2 und s_5 aus den Schleusen I und IV geschleppt haben, bis zum unteren oder oberen Vorhafen, um für die nächsten durchzuschleusenden Schiffe zur Verfügung zu stehen. Dabei sind dann statt zehn Maschinen nur sechs zur Aufrechterhaltung desselben Betriebes nötig. Weiterhin ist dadurch nach beendetem Dienst die Unterbringung aller Lokomotiven in einen gemeinsamen Schuppen möglich geworden, und es erübrigte sich die Schaffung einzelner Schutzschuppen in den Haltungen und Vorhäfen. Auch die Herbeischaffung von Ersatzmaschinen gestaltet sich sehr einfach.

In Abb. 1 bis 3 Bl. 20 ist eine Zwischenhaltung mit zwei anschließenden Schleusen im Grund- und Aufriß dargestellt. Die Gleise sowie die Kähne mit ihren Lokomotiven in den Stellungen vor und nach dem Schleppbetrieb sind eingetragen. Den Verlauf des Schleppbetriebes in einer Haltung läßt der darüber gezeichnete Plan erkennen, dessen Abszissen die Wege und dessen Ordinaten die Zeiten angeben. Aus demselben sind sowohl die Fahrzeiten und Wege während der Beschleunigung und während der Fahrt mit gleicher Geschwindigkeit für die Lokomotiven und Schiffe, als auch die Auslaufzeiten und Wege der letzteren zu ersehen. Daneben gibt er die Verschiebefahrten nach Weg und Zeit, die Aufenthalte durch Weichenstellen und die Pausen an.

Die Zugtrosse, die bei Beginn des Schleppens zur Vermeidung eines zu schrägen Zugs rd. 70 m lang sein muß, findet am Oberhaupt durch das Schleusenmauerwerk und durch die Aufbauten kein Hindernis, während sie beim Unterhaupt durch eine Schleusenkante abgelenkt wird. Ob hier eine einfache Gleitschutzkonstruktion zur Vermeidung eines schäd-

lichen Verschleißes der Trosse ausreicht, oder ob eine Rolle oder Walze nachträglich erforderlich wird, soll nach längeren Betriebsergebnissen entschieden werden.

Die Schiffe müssen auf rd. 25 bis 15 m an die Schleusenhäupter geschleppt werden, damit ihre lebendige Kraft ausreicht, sie noch schnell genug in die Kammern einfahren zu lassen. Auf dem Fahrplan ist daher angenommen, daß jede Lokomotive am Ende der Haltungen hält und sofort als Spill mit dem hierfür vorgesehenen Motor weiterarbeitet. Es ist jedoch auch möglich, während der Fahrt die Trosse auf diese Art zu kürzen, so daß beim Halten der Maschine der Zug aufhört und die Trosse abgeworfen wird. Ein stoßfreies Arbeiten nach beiden Verfahren ist durch die feine Regelbarkeit der Repulsionsmotoren ohne Schwierigkeit möglich.

Die Beschleunigungszeit und die Fahrt mit gleichbleibender Geschwindigkeit sind mit je drei Minuten, die Betriebszeit als Spill wirkend mit 40 Sekunden bestimmt. Die ganze Fahrzeit der Schiffe von einer Schleuse zur nächsten durch die Haltung beträgt rd. zwölf Minuten. Die Wartezeit der Lokomotiven und das Heben oder Senken der Schiffe in den Schleusenkammern kennzeichnen sich als senkrechte Linien. Mit dem Fahrplan zeichnerisch verbunden ist ein Betriebsplan für die Bedienung der Maschineneinrichtungen und der Schiffe. Für jede Schleuse sind zwei Schleusenwärter vorgesehen und dementsprechend auch zwei Betriebslinien vorhanden. Die senkrechten Linien geben die Betriebszeiten der Motoren, die Dauer der Bedienung der Schiffe und die Wartezeiten für die Bedienungsmannschaft an. Die schrägen Linien stellen die Wege und die für ihre Zurücklegung erforderliche Zeit dar.

In der Text-Abb. 28 ist ein Fahr- und Betriebsplan für die ganze Schleusentreppe auf Grund desjenigen für eine Haltung (Abb. 1 bis 3 Bl. 20) zusammengestellt. Es ist dabei, wie der Grundriß zeigt, davon ausgegangen, daß kein Betrieb auf der Schleusentreppe herrscht und in dem oberen und unteren Vorhafen je ein Schiff zur Einfahrt in die Schleusen I und IV bereit liegt. Der Plan ist soweit durchgeführt, bis diese beiden Schiffe die ganze Schleusentreppe durchfahren haben und die Lokomotiven wieder an ihre Anfangsstellungen zurückgekehrt sind. Auch die Wartezeit der Lokomotiven bis zum nächsten Schleppbetrieb ist noch miteingezeichnet. Die Gesamtdurchfahrzeit durch die Schleusentreppe beträgt rd. 80 bis 85 Minuten, die für eine Doppelschleusung rd. 40 Minuten. Der Betriebsplan läßt nach Erreichen des Vollbetriebes, wie bereits in Text-Abb. 30 dargestellt, das taktmäßige Schleusen und abwechselnde Kreuzen in den Vorhäfen 1 und 5 und der mittleren Zwischenhaltung 3 sowie in den Haltungen 2 und 4 erkennen. Die Betriebslinien zeigen, daß die Schleusenwärter (a — h) auf jeder Schleuse jeweils bei einer Schleusung die Maschinenantriebe und bei der nächsten das Schiff zu bedienen haben, und umgekehrt.

Stromverbrauch. Ein Schiff durchfährt die Schleusentreppe in rd. 80 Minuten, entsprechend der Zeit für zwei Doppelschleusungen. Da nun nach jeder Doppelschleusung je ein Schiff den unteren und oberen Vorhafen verläßt, gilt der Stromverbrauch während dieser Zeit für den Schleppbetrieb und für die Schleuseneinrichtungen für zwei Schiffe. Derselbe beträgt nach rechnerischer Ermittlung für eine Doppelschleusung, also für zwei Schiffe, 33 KW.-Stunden. Hierin sind eingeschlossen alle aus dem Betriebsplan ersichtlichen Fahrten unter Zug, Verschiebefahrten auf ebener und geneigter Strecke und die gesamten Motorleistungen der Schleusenantriebe. Der Wirkungsgrad der Motoren, die Leitungsverluste und der Mehrbedarf an Strom durch die Läuferwiderstände ist berücksichtigt, dagegen nicht der Leistungsbedarf für die Beleuchtung. Von den 33 KW.-Stunden entfallen rd. 29 auf den Schleppbetrieb und vier auf die Schleusenantriebe. Bei vollem Betriebe an der Schleusentreppe, der die beste Ausnutzung der Anlage darstellt, beansprucht ein Schiff zur Durchfahrt 16,5 KW.-Stunden. Anderseits tritt der höchste Stromverbrauch hierfür bei Durchfahrt nur eines Schiffes auf der ganzen Treppe auf. Er beträgt 22,5 KW.-Stunden. Hierbei ist angenommen, daß alle Schleusen mitbetrieben werden.

Umformerstation. Zur Umwandlung des aus dem Netz des Überlandkraftwerkes Heegermühle entnommenen Stromes auf die Verbrauchsspannungen für den Treidelbetrieb, für die Schleusenantriebe, für die Werkstatt und die Beleuchtung dient eine im Werkstattgebäude gelegene Umformerstation.

Für die Schleusentreppe selbst sind zwei Drehstrom- und zwei Einphasenstrom-Transformatoren aufgestellt, welche die vom Hochspannungsnetz gelieferte Spannung von 10000 Volt Drehstrom auf die erforderlichen Spannungen umformen. Die zwei Einphasenstrom-Transformatoren sind für den Treidelbetrieb bestimmt und liefern in Scottscher Schaltung Wechselstrom von 550 Volt. Die Leistung dieser beiden Transformatoren beträgt zusammen 130 KVA. Von den beiden Drehstrom-Transformatoren dient einer von 160 KVA. und 500 Volt zum Speisen der Schleusenantriebe und Werkstätteneinrichtungen, während der andere von 30 KVA. und 220 Volt die Beleuchtung übernimmt.

Sämtliche Transformatoren sind über die für einen einwandfreien Betrieb erforderlichen Meßapparate und Schalter an die Hochspannungs-Sammelschienen angeschlossen. Hinreichende Überspannungsschutz-Einrichtungen sichern außerdem die ganze Anlage gegen schädliche Überspannungen und atmosphärische Entladungen.

Die Schaltung der gesamten Anlage zeigt Text-Abb. 31. Um die Verteilung des dem Hochspannungsnetz entnommenen Stromes auf die verschiedenen Verbrauchsstellen feststellen zu können, sind für jeden Abzweig Zähler vorgesehen, und zwar getrennt für die beiden Treidelstrecken, die Schleusenantriebe, die Werkstättenantriebe und für die Beleuchtungsanlagen. Da sowohl von den Sammelschienen der Treidelanlage als auch von denen für die Beleuchtung Freileitungen abgehen, wurden hierfür noch besondere Blitzschutzvorrichtungen angebracht. Eine Prüfeinrichtung gestattet außerdem die Feststellung des Isolationszustandes der ganzen Anlage.

Die Hoch- und Niederspannungsanlagen sind zwar in einem gemeinsamen Raume des Werkstattgebäudes untergebracht, jedoch durch eine Durowand voneinander getrennt. Auf dieser Wand sind der Haupt- und Kontrollzähler sowie die Handräder für die Betätigung der Hochspannungs-Ölschalter angebracht, so daß diese vom Niederspannungsraum aus betätigt werden können. Ein Betreten des Hochspannungsraumes selbst ist bei gewöhnlichem Betrieb demnach nicht erforderlich.

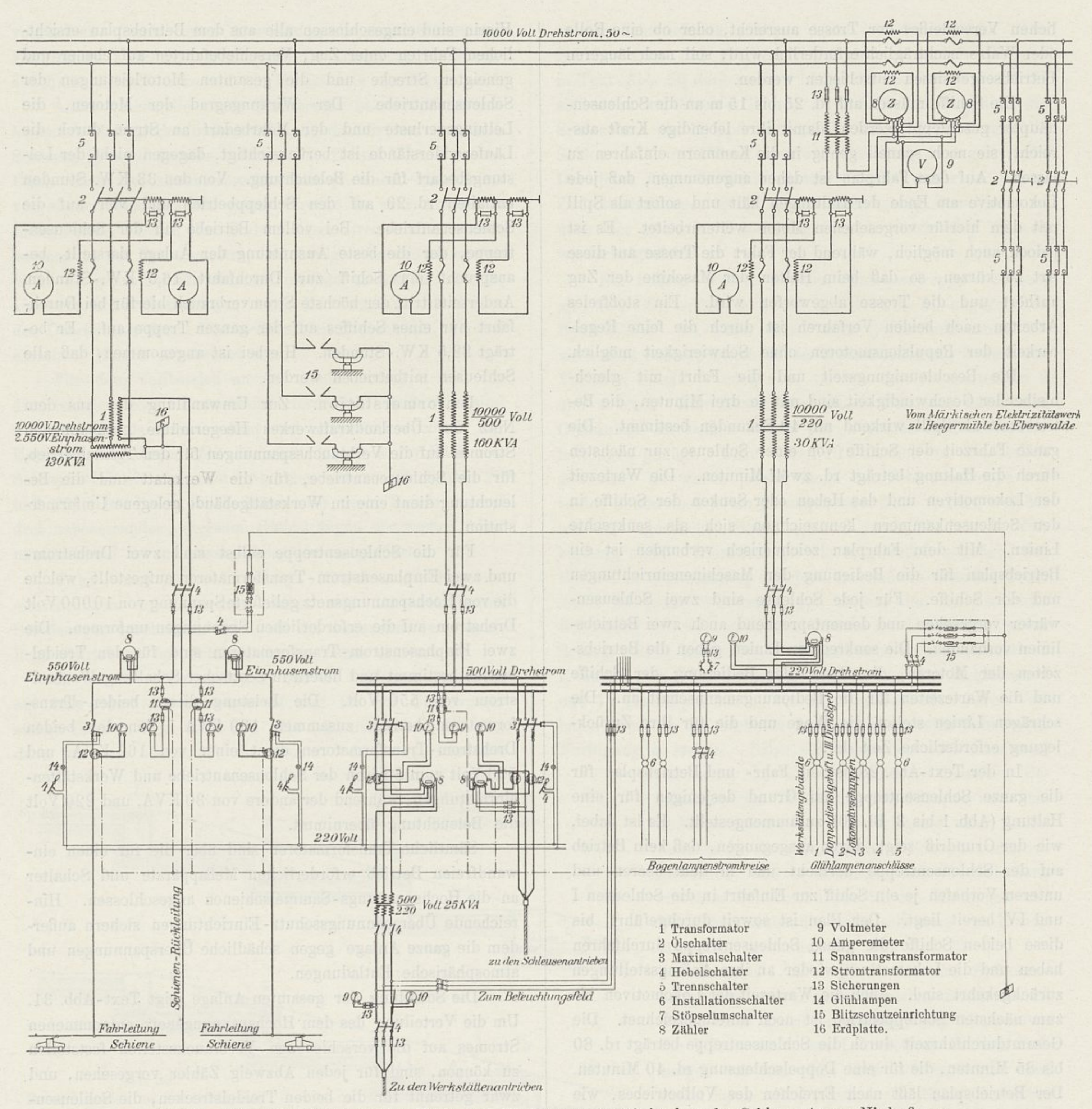


Abb. 31. Schaltungsschema für die Hoch- und Niederspannungsschaltanlage der Schleusentreppe Niederfinow.

Werkstatt. Auf der Nordseite der Schleusentreppe bei Schleuse IV befindet sich ein Werkstättengebäude, wo sich außer den beiden Räumen für die Hoch- und Niederspannungsanlage eine geräumige Schlosserei, eine Schmiede und eine Mechanikerwerkstatt sowie verschiedene Lager- und Mannschaftsräume befinden. In den der Schlosserei dienenden Räumen sind unter Berücksichtigung der in Frage kommenden Ausbesserungen Drehbänke, Bohr- und Shäpingmaschinen sowie einige Hilfsmaschinen aufgestellt. Ebenso ist der Umfang und die Einrichtung der Schmiede den Bedürfnissen angepaßt, so daß bei Störungen im mechanischen oder elektrischen Teil der Betriebsanlage schnellste Abhilfe zu erwarten ist. Damit schwere Arbeitsstücke leicht in die Werkstatt befördert werden können, ist ein Schienenstrang von der Gleisanlage bis zu dieser verlegt. Außerdem ist in der Werkstatt ein Laufkran vorhanden.

Als Antriebmotoren für die Arbeitsmaschinen sind Motoren von 0,5 bis 4 PS. für 220 Volt Spannung gewählt worden. Für die elektrisch betriebenen Handwerkzeuge sind Steckdosen vorgesehen. Sämtliche Motoren und Steckdosen sind mittels Kabelleitungen, die in Kanälen unter dem Fußboden des Gebäudes verlegt sind, an eine besondere Marmortafel mit Schaltern und Sicherungen angeschlossen. Diese hat in der Schlosserei ihren Platz gefunden und außer diesen Kraftanschlüssen gleichzeitig auch die einzelnen Abzweige für die Beleuchtungsstromkreise des Werkstättengebäudes erhalten.

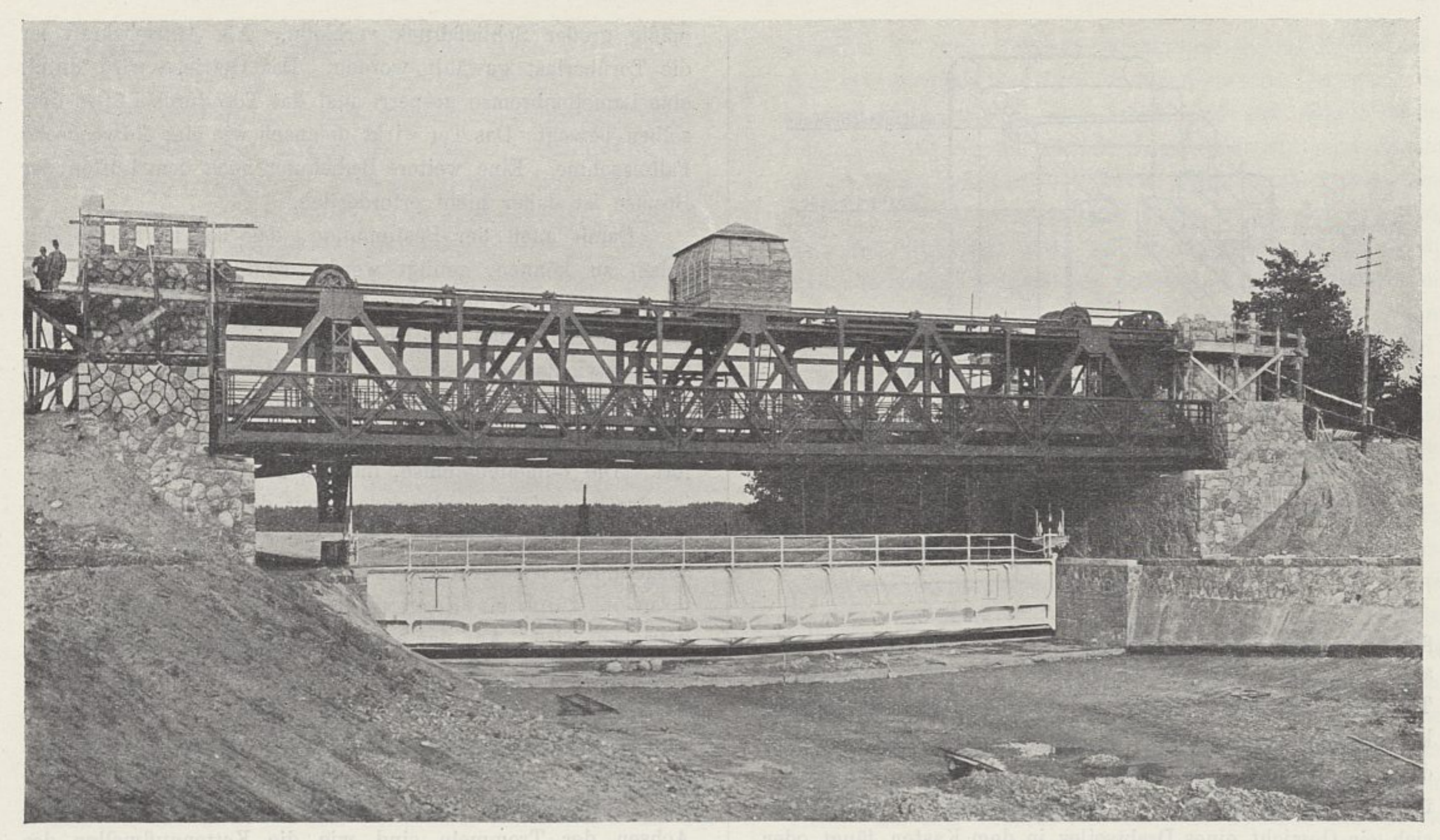


Abb. 32. Sicherheitstor am Pechteich in geschlossener Stellung während des Zusammenbaues.

Beleuchtung. Über die Beleuchtung der Schleusentreppe mit ihren Kammern, Zwischenhaltungen und Vorhäfen sind zurzeit noch keine endgültigen Entscheidungen getroffen.

Die Schleusentreppe wird jedoch in ausreichender Weise durch Bogenlampen, gegebenenfalls auch unter Zuhilfenahme von Glühlampen, deren Anschluß in Freileitung ausgeführt wird, beleuchtet werden. Zurzeit finden noch Versuche statt, teils mit Bogenlampen, teils mit hochkerzigen Metallfadenlampen, um die vorteilhafteste Lichtpunkthöhe, Kerzenstärke, Lampenzahl und Verteilung festzustellen.

Die über das Schleusengelände verteilten Dienstgebäude, der Lokomotivschuppen und das Werkstättengebäude sind mit Glühlichtbeleuchtung ausgestattet. Als Speiseleitung sind blanke Kupferleitungen und Kabel verwendet worden.

Sicherheitstore.

Die drei Sicherheitstore des Großschiffahrtweges, die für den Fall eines Damm- oder Bauwerkbruches durch sofortigen Abschluß der betreffenden Kanalstrecke den Schiffahrtbetrieb und die durchschnittenen Täler möglichst vor Gefahren schützen sollen, sind mit den Wegebrücken an den Chausseen Marienwerder-Steinfurth, Eberswalde-Lichterfelde und Eberswalde-Chorin baulich vereinigt (vgl. Bl. 52 vor. Jahrg.). Sie sind als Falltore ausgebildet (Text-Abb. 32 und Abb. 1 bis 7 Bl. 21). Der den Wasserquerschnitt abschließende Torkörper besteht aus einer flachen Blechwand, die gegen den Wasserdruck durch zwei wagerechte, übereinander liegende und durch die senkrechte Blechwand in zwei gleiche Teile zerlegte Fischbauchträger ausgesteift ist. Sie überträgt den Druck auf Nischen im Pfeilermauerwerk. Die Lage der Träger ist so gewählt, daß beide ungefähr gleichmäßig durch den Wasserdruck beansprucht werden. Die Tore haben ein Gewicht von rd. 40 t bei 2,7 m Breite und 2,9 m Höhe in der Mitte und 2,5 m Höhe an den Seiten. Bei gewöhnlichem Stau ragt die obere wagerechte Torkante 20 cm über den Wasserspiegel. Der Hub der Tore beträgt 7 m, so daß bei gehobenem Tor der tiefste Punkt der Dichtungsbohle über Unterkante der Untergurte von Tor und Brückenträger liegt und daher der Durchfahrtquerschnitt nicht eingeengt wird. Die Druckübertragung erfolgt durch je drei Rollen auf jeder Torseite, welche auf in den Mauernischen angebrachten Führungsschienen laufen. Diese sind, da die Tore doppelseitig kehren müssen, auf beiden Seiten der Nischen angebracht. Gegen Bewegungen senkrecht zur Kanalachse ist das Tor auf jeder Stirnseite durch zwei kleine Rollen gesichert, so daß nach diesen Richtungen Verklemmungen nicht eintreten können. Die Führungen reichen 80 cm über den Treidelpfad und setzen sich nach einer Unterbrechung von 60 cm bis zum Obergurt fort. Die Unterbrechung ist angeordnet, um einen etwa erfolgenden Treidelzug vom Ufer aus nicht zu behindern. Die Dichtung erfolgt am unteren Rande des Tores durch eine eichene Holzbohle, die sich auf eine Granitschwelle in der Kanalsohle aufsetzt. Die seitliche Dichtung geschieht durch am Tor hängende bewegliche eiserne Nadeln, die vom Wasserdruck gegen Tor und Nische gedrückt werden.

Im folgenden sei nun zunächst die Toraufhängung, der Gewichtsausgleich und der Antrieb näher beschrieben (Text-Abb. 33).

Das Tor ist an beiden Enden an Querträgern pendelnd aufgehängt. An jedem der zwei Querträger greifen an den Enden zwei Gallsche Ketten und dazwischen zwei Stahldrahtseile an, die über Kettenräder und Seilscheiben geführt sind und an ihren anderen Enden Gegengewichte tragen. Diese sind in einem besonderen Schacht geführt und bestehen aus je einem Gewichtskasten, der durch die Gallschen Ketten

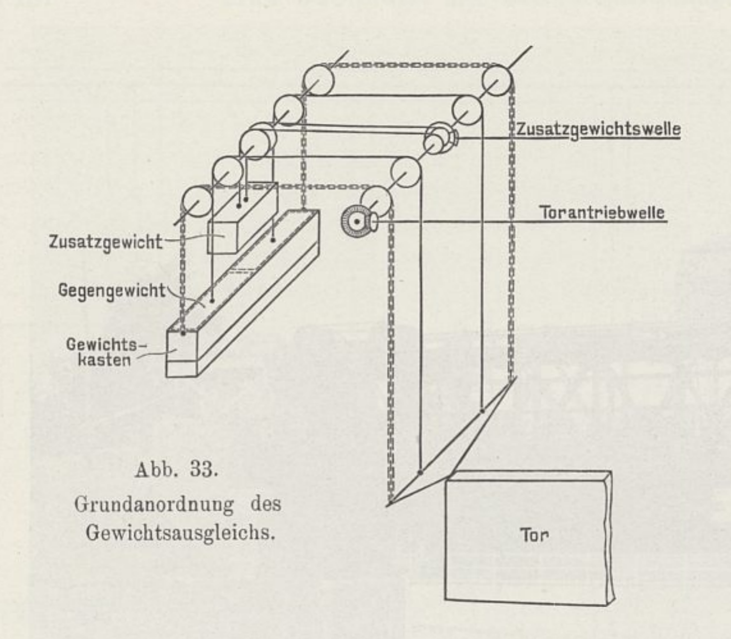


Abb. 33.
Grundanordnung des Gewichtsausgleichs.

getragen wird. In demselben hängen zwei Gegengewichte an Drahtseilen. Hierdurch ist erreicht, daß die einzelnen Tragteile sich gegenseitig trotz Längungen nicht beeinflussen können und daher dauernd die gleiche Last tragen. Außerdem übernehmen beim Reißen eines tragenden Teiles die übrigen den ganzen Gewichtsausgleich dadurch weiter, daß sich ein Gewicht eines Drahtseiles in dem Kasten fängt oder umgekehrt der Gewichtskasten sich auf die Gewichte der Drahtseile aufsetzt. Seile und Ketten sind so berechnet, daß beim Reißen der Seile die Ketten und beim Reißen der Ketten die Seile Tor und Gewichte noch mit fünffacher Sicherheit tragen. Diese Anordnung ist derjenigen an den Hubtoren der Schleuse Klein-Machnow am Teltowkanal nachgebildet.

Für eine Parallelführung der Gegengewichte ist durch einen die Achse der Kettenräder und Seilscheiben mittels Kegelräder verbindenden Wellenstrang, der über den Hauptträgern gelagert ist, gesorgt. In dem Wellenstrang ist die Triebvorrichtung für das Tor eingebaut. Für diese war die Bedingung gestellt, das Tor sollte durch einen Mann in rund zwei Minuten gesenkt und wenn möglich auch in gleicher Zeit gehoben werden können. Das letztere war verlangt, um nach Betriebsversuchen die Schiffahrt durch ein langsames Aufkurbeln des Tores von Hand nicht zu lange zu stören. Um diesen Bestimmungen zu genügen, wurde zuerst angestrebt, einen völligen Gewichtsausgleich für alle Torstellungen herzustellen, so daß die Arbeitsleistung eines Mannes zur Betätigung des Tores ausreichte. Unter Berücksichtigung des Wasserauftriebes und der Überlast von Ketten und Seilen wurden daher hierfür Kurvenscheiben vorgeschlagen, an denen die Seile der Gegengewichte angreifen sollten. Die näheren Untersuchungen ergaben jedoch, daß die Reibungsverhältnisse und die durch Wasserströmungen hervorgerufenen Widerstände selbst bei geringen, praktisch möglichen Änderungen der Reibungszahlen Leistungen für die Torbewegungen beanspruchte, die ein Versagen der Anlage nicht ausgeschlossen hätten. Daher wurde auf einen Ausgleich mit Kurvenscheiben verzichtet und Kreisscheiben gewählt. Dem Tor wurde hierbei eine solche Überlast gegeben, daß durch diese alle auftretenden Reibungs- und Strömungswiderstände sicher überwunden werden und in der Schlußstellung noch ein verhältnismäßig großer Schließdruck verbleibt. Als Antriebskraft ist die Torüberlast gewählt worden. Das Getriebe wird durch eine Lamellenbremse gesperrt und das Tor durch Lüften derselben bewegt. Das Tor wirkt demnach wie eine Adwoodsche Fallmaschine. Eine weitere Bedienung nach dem Lüften der Bremse ist daher nicht erforderlich.

Damit auch der Bestimmung, das Tor in kurzer Zeit heben zu können, genügt werde, sind Zusatzgewichte angeordnet, die auf den Gewichtskasten herabgelassen werden und bewirken, daß die Überlast von der Torseite auf die Gegengewichtseite übergeht. Beim Heben des Tores dient daher ebenfalls die Überlast als treibende Kraft, und es fällt auch hier die Bedienung einer Kurbel während des Hebens fort. Die Lamellenbremse, die das Tor in seiner Lage hält, ist durch zwei Stirnradvorgelege mit der Hauptantriebswelle verbunden (Text-Abb. 34). Sie wird durch eine als Stirnrad ausgebildete Wandermutter zusammengepreßt oder gelöst, die ihrerseits durch ein Kegelradpaar von einer Handkurbel angetrieben wird. Auf der Achse der Lamellenbremse ist noch eine Schleuderbremse angeordnet, damit eine bestimmte Geschwindigkeit nicht überschritten wird. Jedes der zwei Zusatzgewichte ist mittels loser Rollen an einem Seilstrang aufgehängt, dessen Enden sich auf eine Trommel mit rechts- und linksgängigen Rillen aufrollen oder abwickeln. Die Achsen der Trommeln sind wie die Kettennußwellen des Tores durch Kegelräder und einen durchgehenden Wellen-

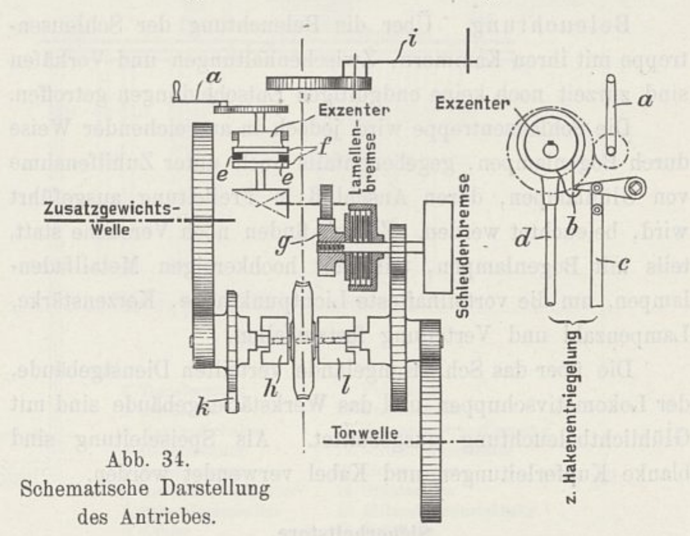


Abb. 34.
Schematische Darstellung des Antriebes.

strang parallel geführt. In der Mitte dieser Welle ist das Windwerk für die Zusatzgewichte, das aus zwei Stirnradvorgelegen und einem auf der Achse festgekeilten Schneckentriebe besteht, eingebaut. Auf der Schneckenradwelle sitzt eine Klauenkupplung, durch die das Zusatzgewicht abgekuppelt werden kann. Um ein Abstürzen desselben zu verhüten, ist die eine Kupplungshälfte als Sperrad ausgebildet. Durch eine an der anderen Seite des Schneckenrades sitzende Kupplung ist es möglich, den Zusatzgewichtsantrieb auch mit dem Wellenstrang zum Bewegen des Tores zu verbinden, damit, wenn erforderlich, durch Anheben der Gegengewichte noch eine größere Überlast auf der Torseite erzielt werden kann.

Gegen Herabstürzen infolge von Seil- oder Kettenbrüchen sind das Tor und die Zusatzgewichte durch Haken und Riegel gesichert, die jedoch in der gewöhnlichen Betriebsstellung einen gewissen Abstand von den Aufsatzflächen haben. Das

Fortziehen der als zweiarmige Pendelhaken ausgebildeten, durch Gestänge untereinander und mit der Lamellenlösevorrichtung verbundenen Sicherung geschieht selbsttätig. Dabei ist die Einrichtung so getroffen, daß mit derselben Kurbel hintereinander erst die Entrieglung und dann das Lösen der Lamellenbremse erfolgt. Das Hakengestänge wird zu Beginn der Kurbelbewegung freigegeben, und ein an diesem vorgesehenes Gewicht zieht die Haken unter dem Tor fort. Damit die Entrieglung unter allen Umständen beendet ist, wenn die Lösung der Lamellen beginnt, ist die Kurbelachse geteilt. Sie trägt an den sich gegenüberliegenden Enden Scheiben, die je einen Anschlagnocken haben. Hierdurch ist erreicht, daß das der Kurbel zunächst liegende, die Freigebevorrichtung tragende Wellenende einen Leergang bis zum Aneinanderschlagen der Nocken ausführen muß. Erst dann wird das andere Wellenstück mitgenommen und dadurch ein Lösen der Lamellen möglich. Sollte sich das Riegelgestänge festgesetzt haben und durch das Fallen des Entrieglungsgewichtes sich nicht bewegen, so wird es zwangläufig durch einen Exzenter während der Leergangszeit fortgepreßt. Um durch diese etwa auftretenden Zusatzkräfte keinen unzulässigen Kurbeldruck zu erhalten, ist die Kurbel noch mit einem Vorgelege 1:3 angeschlossen, so daß beim gewöhnlichen Betriebe bei zwei bis drei Kilogramm Kurbeldruck das Tor mit 15 facher Sicherheit gehalten wird. Die Sicherungen für die Zusatzgewichte sind als Flachriegel ausgebildet, die untereinander durch Gestänge gekuppelt sind und mit der Hand durch einen besonderen Hebel betätigt werden. Auf eine selbsttätige Entrieglung ist, da es beim Heben der Tore auf einen geringen Mehrzeitaufwand und auf unbedingte Verhütung von Bedienungsfehlern nicht ankommt, verzichtet worden.

Der Betrieb eines Sicherheitstores gestaltet sich wie folgt. Das Tor befindet sich gewöhnlich in seiner höchsten Stellung und wird durch die Lamellenbremse gehalten und durch die Haken gesichert. Die Torgegengewichte hängen dabei in der tiefsten Stellung in den Schächten, die Zusatzgewichte, die durch die Riegel gesichert sind, in der höchsten. Die ganze Anlage befindet sich in diesem Zustande in Betriebsbereitschaft. Soll das Tor gesenkt werden, so wird die Handkurbel *a* (Text-Abb. 34) nach links gedreht, wodurch nach kurzem Wege die an der Exzenterscheibe sitzende Nase *b* fortgezogen und die Haken durch das im Gestänge *c* angeordnete Gewicht betätigt werden. Der Exzenterring mit seinem Gestänge *d* wird dabei aus seiner höchsten Stellung nach unten bewegt und preßt, falls die Haken durch das Gewicht nicht bewegt worden sind, diese gewaltsam fort. Hiernach kommen die Nocken *e* der Kuppelscheiben *f* zum Anschlag und lösen bei der Weiterbewegung der Kurbel durch das Getriebe und die Wandermutter *g* die Lamellenbremse. Das Tor bewegt sich dann ohne jede weitere Handhabung bis zu seiner tiefsten Stellung.

Es sei nochmals hervorgehoben, daß das Senken selbst und das vorher erforderliche Entriegeln von derselben Kurbel *a* aus erfolgt. Entriegeln und Ingangsetzen sind zusammengelegt, um Zeit zu sparen und falsche Handgriffe auszuschließen.

Zum Heben des Tores werden zunächst die Riegel durch einen Hebel fortgezogen und die Kupplung *m* eingeschaltet. Dem dann folgenden Senken und Aufsetzen der Zusatzgewichte auf den Gegengewichtskasten durch die Kurbel *i* geht ein geringes Anheben derselben zwecks Umlegung der Sperrklinke *k* voraus. Das Tor bewegt sich darauf wieder selbsttätig bis in die höchste Lage. Sowohl beim Senken als auch beim Heben des Tores kann durch verschiedene Pressung der Lamellen von der Kurbel *a* aus eine Abstufung bis zum Stillstand oder bis zu der höchsten durch die Schleuderbremse festgesetzten Geschwindigkeit erzielt werden.

Nach jedem Senken und Heben des Tores müssen dann die Zusatzgewichte wieder mit der Hand durch die Kurbel *i* hochgewunden werden. Sollte sich das Sicherheitstor aus irgend einem Grunde nicht bewegen, so kann es nach Einschalten der Kupplung *l* durch die Kurbel *i* gesenkt oder gehoben werden.

Im einzelnen sei noch folgendes bemerkt. Jedes Tor besitzt in seiner Blechhaut zwei durch Spindel und Handrad bewegbare Gleitschütze von je 0,9 qm Öffnung. Die Schütze werden von einem über das ganze Tor reichenden Laufsteg aus bedient. In die durchgehenden langen Wellen sind in der Nähe des Antriebs Dehnungskupplungen eingebaut, damit Temperaturschwankungen keinen Einfluß auf den Antrieb ausüben können. Der Antrieb ist in einem Schutzhäuschen untergebracht, ebenso die Rollen, Treibscheiben und Trommeln. Bei dem Probebetrieb hat sich ergeben, daß die Betriebseinrichtung sicher und gut arbeitet. Die Senk- und Hubzeit beträgt je rund eine Minute, das Hochkurbeln der Zusatzgewinde etwa zwei Stunden.

Wehre.

Durch den Bau der neuen Schleuse bei Spandau auf der von der alten Freiarche bestandenen Fläche wurde der Bau einer neuen für rd. 60 cbm sekundlicher Wasserabführung erforderlich. Die nötige Wehrbreite von 12 m wurde auf zwei Archen von gleichen Abmessungen verteilt, von denen eine in das Glacis der Zitadelle in Spandau, die zweite westlich neben die neue Schleuse gelegt wurde. Als Stauvorrichtungen wurden Segmentwehre gewählt. Ihre besonderen Vorzüge bestehen darin, daß bei geringem Baugewicht die Mittelkraft der Wasserdrücke bei stehendem und bei strömendem Wasser in jeder Stellung durch den Drehpunkt geht. Der Widerstand beim Heben setzt sich daher lediglich aus dem Eigengewicht und aus der an einem langen Hebelarm wirkenden Zapfenreibung zusammen. Bei einer lichten Weite der Freiarchen von 6 m beträgt die größte Wasserdruckhöhe 2,97 m. In dieses Maß sind 15 cm für Wellengang und Windstau einbegriffen. Der Krümmungshalbmesser der Schützhaut ist den örtlichen Verhältnissen entsprechend mit 4 m angenommen. Der Drehpunkt ist über das Unterwasser gelegt, damit die Lager wasserfrei und daher leicht zugänglich bleiben.

Die Abb. 1 bis 4 Bl. 19 zeigen das Wehr mit Antrieb in der Glacis-Freiarche. Es besteht aus einem steifen portalartigen Rahmen, der als vollwandiger Blechträger ausgebildet und beiderseits in Nischen in wagerecht angeordneten Lagern drehbar ist. Auf dem Querträger des Rahmens sind nach der Drehachse des Wehrs kreisförmig gebogene Rippen nach oben und unten angenietet, die die Blechhaut von 8 mm Stärke tragen. Die Längen der Rippen sind so bemessen, daß die Schwerlinie des größten rd. 32 t betragenden Wasserdruckes in die Mittelebene des Rahmens fällt. Der Seitenriß

des Wehres ähnelt dadurch einer Hammerform. An den unteren Rippen ist die gegen den Wehrrücken dichtende Bohle, an den oberen Rippen sind Abschluß- und Versteifungswinkel angeschlossen. Den Anschluß der Blechkonstruktion an die Lagerachsen bilden fest mit dieser verschraubte Stahlgußklemmen.

Das Wehr wird an jeder Seite durch zwei auf der Wehrhaut befindliche Balken, die sich mit geringem Spiel zwischen je zwei konzentrisch angeordneten Winkeln bewegen, abgedichtet. Durch mitgeführte feste Bestandteile des Wassers setzen sich die geringen Spielräume bald zu und führen eine völlige Dichtung herbei.

Für die Bewegung des Wehres ist Windenantrieb mit selbstsperrender Schnecke gewählt. Die Winde hat auf einem über das Oberwasser führenden Laufsteg Aufstellung gefunden. Das Wehr hängt an beiden Seiten in senkrecht tangential von der Blechhaut fortgeführten kalibrierten Gliederketten, die auf Kettennüssen und Führungsrollen auflaufen und nahe am Grunddichtungsbalken durch Laschen befestigt sind. Die gemeinsame Achse der beiden Kettennüsse steht durch ein Stirnradvorgelege mit der Winde in Verbindung. Die Mittellager dieser Achse gehören zum Gußkörper des Windengehäuses, um ein Biegungsmoment in derselben zu verhindern und ein sicheres Kämmen der Zahnräder zu gewährleisten. Die Übersetzung der Winde ist derart bestimmt, daß das Wehr durch einen Mann in einer Minute etwa 7 cm gehoben werden kann.

Die Querträger zwischen den Längsträgern des Laufsteges sind angeschraubt, so daß nach Entfernung der Winde, des Bohlenbelags und der Querträger die Dammbalken eingebracht werden können. Die wagerechte Kraft des Lagerdruckes wird durch die hintere Wand des Lagerkastens auf einen Granitblock und von hier durch einen aus ⊏- und ∟-Eisen konsolartig ausgebildeten Anker auf die seitliche Betonmauer übertragen. Die senkrechte Seitenkraft wird durch ein eingemauertes U-Eisen mit unterem Querträger aufgenommen.

Bei der Inbetriebnahme zeigte sich, daß das Wehr durch den Wasserdruck nicht unwesentlich in seiner Form verändert wurde. Besonders stark trat diese Formänderung an dem Grundbalken hervor, der an den Enden auflag und sich nach der Mitte hin von der Granitschwelle abhob (vgl. Zentralbl. d. Bauverwalt. 1913 S. 643). Um die hierdurch entstandene Undichtigkeit zu heben, wurden nachträglich an dem Grundbalken Lederstreifen angebracht, die durch den Wasserdruck gegen die Granitschwelle gepreßt werden und abdichten.

Das in Abb. 5 bis 7 Bl. 19 dargestellte, neben der neuen Schleuse gelegene Wehr lehnt sich an die Bauart des in der Glacis-Arche an. Es unterscheidet sich nur dadurch von ihm, daß statt eines im Schwerpunkt des Wasserdruckes stützenden Portalrahmens zwei solcher an der Ober- und Unterkante angebracht sind, zwischen denen die die Blechhaut tragenden Rippen als Träger gleichen Widerstandes ausgebildet sind. Diese Bauart wurde gewählt, um störende Durchbiegungen, wie sie sich bei dem Wehr an der Glacis-Freiarche gezeigt hatten, zu verhüten (vgl. auch Zentralblatt der Bauverwaltung 1913, S. 420).

Auch die Seitendichtung zeigt eine abweichende Bauart. Sie besteht aus eichenen Dichtungsleisten, die seitlich auf die Eckrippen aufgeschraubt sind und deren Vorderfläche der Krümmung der Blechhaut folgt. Zur Erreichung eines vollkommen dichten Abschlusses sind auf den Vorderflächen der Dichtungsleisten Lederstreifen aufgeschraubt worden. Gegen den Wehrrücken wird das Segment durch eine an dem Querträger des unteren Rahmens befestigte Leiste aus Eichenholz und durch eine in die Sohle eingelegte eichene Schwelle abgedichtet.

Die Bewegungsvorrichtung entspricht der des Wehres in dem Festungsgelände.

Die neben der Westoderschleuse in Hohensaathen (Abb. 3 Bl. 54 vor. Jahrg.) neu errichtete Stauanlage ist als Schützenwehr ausgeführt (Bl. 22). Die drei Öffnungen des Wehres von je 7,5 m lichter Weite sind im unteren Teil durch Rollschütze von rd. 3 m Höhe, im oberen Teil durch auf diese aufstellbare Nadeln absperrbar. Die bauliche Anordnung ist ähnlich derjenigen des Herbrumer Schützenwehres (s. S. 577 Jahrg. 1901 d. Zeitschr.). Jeder Schützkörper besteht aus einem Rahmen, dessen unterer Riegel als Blechträger ausgebildet ist und 0,8 m von der Unterkante des Dichtungsbalkens entfernt liegt. Der obere Riegel, ein I-Eisen N.-P. 40, schließt mit der Oberkante des Schützes ab. Die zwei als Kastenträger ausgebildeten seitlichen Ständer tragen je zwei Laufrollen, die den Schützdruck auf das Mauerwerk mittels Schienen und Unterlagplatten übertragen. Die 10 mm starke Blechhaut ist durch lotrechte U-Eisen N. P. 12 ausgesteift. Da das Wehr nach beiden Seiten kehren muß, sind die Schienen in den Führungsschlitzen des Mauerwerkes beiderseitig angebracht. Von der Druckübertragung durch Rollenleiter und Druckrollen wurde zur Erhöhung der Betriebssicherheit und Vereinfachung der Bedienung abgesehen. Die gewählten Rollen haben einen Durchmesser von 450 mm erhalten, so daß sie über die Kastenträger hinausragen und den Druck nach beiden Seiten hin übertragen können.

Jede Schütztafel hängt an zwei Gallschen Ketten, die an den Kastenträgern oben angreifen und über Treibräder laufen. Diese sind zur Erreichung einer Parallelführung auf einer auf der Laufbrücke gelagerten durchgehenden Welle aufgekeilt. Die auf diese Wellen arbeitenden Antriebwinden sind in der Mitte jeder Wehröffnung auf dem Laufsteg aufgestellt. Die Schütztafeln sind, da eine schnelle Bewegung nicht erforderlich war, ohne Gegengewichtsausgleich. Das Senken derselben kann durch einen, das Heben durch zwei Mann mit einer Geschwindigkeit von 5 bis 10 cm in der Minute erfolgen.

Ausführende Firmen. Bei der Ausführung der im vorstehenden beschriebenen Betriebseinrichtungen des Großschiffahrtweges Berlin-Stettin waren verschiedene Unternehmer beteiligt. Es lieferten die Firmen: Eisenwerk (vorm. Nagel u. Kaemp), Hamburg-Uhlenhorst, die Spille für die Lehnitzschleuse; Hein, Lehmann u. Ko., Akt.-Ges., Reinickendorf-Berlin, die Tore und Umlaufverschlüsse für die Schleuse Spandau, die Stadt-Freiarche Spandau und die Tore für die Schleuse Lehnitz; Berliner Aktien-Gesellschaft für Eisengießerei und Maschinenfabrikation (früher J. C. Freund u. Ko.), Charlottenburg, die Tore und Umlaufverschlüsse für die Schleusen Plötzensee und die Zitadellen-Freiarche Spandau; Beuchelt u. Ko., Grünberg in Schlesien, sämtliche Tore, Umlaufverschlüsse und Sparbeckenventile für die vier Schleusen

der Schleusentreppe Niederfinow; Fr. Gebauer, Berlin, die Umlaufverschlüsse für die Schleuse Lehnitz, die Rollschütze für die Ostoderschleuse Hohensaathen, die Spille für die Schleusen Plötzensee und Spandau, die drei Sicherheitstore mit ihren Bewegungsvorrichtungen und sämtliche Maschinen- und Handantriebe aller Betriebseinrichtungen der Schleusen Spandau, Lehnitz, Niederfinow und der Ostoderschleuse Hohensaathen; Vereinigte Kammerich und Belter u. Schneevogtsche Werke, Akt.-Ges., Berlin, die Tore der Ostoderschleuse, die Tore, Rollschützen und Antriebe der Westoderschleuse und das Wehr Hohensaathen mit seinen Antrieben; Siemens-Schuckertwerke, G. m. b. H., Berlin, die elektrische Ausrüstung der Schleusenantriebe, die Beleuchtung und das Kraftwerk der Schleuse Lehnitz, die elektrische Ausrüstung der Antriebe der Schleuseneinrichtungen, den elektrischen Schiffszug mit den Lokomotiven, der Gleisanlage mit der Oberleitung und die Beleuchtung der Schleusentreppe Niederfinow.

Ein Teil der Betriebseinrichtungen, z. B. diejenigen der Schleusen Plötzensee und Spandau, befinden sich seit längerer Zeit im Betriebe. Bei den übrigen hat ein Probebetrieb stattgefunden. Nach den Ergebnissen hierbei können die Anlagen als vollkommen gelungen bezeichnet werden.

Die beteiligten Firmen haben durch gute konstruktive Durchbildung aller Einzelheiten, durch einwandfreie Arbeit und Aufstellung wesentlich mit zu diesem Erfolg beigetragen.

Abriß einer allgemeinen Theorie des eingespannten Trägers mit räumlich gewundener Mittellinie.

Von Dr.-Ing. H. Marcus in Breslau.

Die Beanspruchung räumlich gewundener Träger ist in den technischen Schriften nur selten einer scharfen Untersuchung unterzogen worden. Die wenigen Veröffentlichungen, welche sich mit dieser Aufgabe befassen, sind bezüglich der Querschnittsausbildung, der Formgebung und der Stützungsart des Tragwerkes an besondere Voraussetzungen, welche zwar die Erzielung einfacher Schlußformeln ermöglichen, den Gültigkeitsbereich der Lösung jedoch wesentlich einschränken, gebunden.[1]) Eine allgemeinere Behandlung der Untersuchung wäre um so wünschenswerter, als die Annahmen, welche in rechnerischer Hinsicht den Vorzug verdienen, nicht immer zugleich diejenigen sind, welche sich in der baulichen Gliederung am einwandfreiesten verwirklichen lassen. Bei manchen Trägerarten ist beispielsweise die Einschaltung von Gelenken unter Umständen nur durch statische Gründe bedingt, während die Anordnung einer biegungsfesten Verbindung für die praktische Ausführung einfacher und zweckmäßiger wäre. Eine allgemeinere Fassung der Aufgabe könnte auch den Vorteil bieten, daß sich aus derselben alle Beziehungen, welche für besondere Trägergestaltungen und Lagerungsarten gelten, in übersichtlicher Weise entwickeln und darstellen ließen. Die vorliegende Arbeit ist aus dem Bestreben, den Weg zu einer solchen umfassenden Behandlung zu bahnen, entstanden. Ihr Ziel ist die Erforschung der Theorie des räumlich gewundenen Trägers mit beiderseitiger Einspannnng. Die nachfolgenden Untersuchungen sind in zwei Abschnitte geteilt. Zunächst werden die allgemeinen Elastizitätsgleichungen des Gebildes aufgestellt und einer Prüfung unterzogen, und sodann wird an einem Zahlenbeispiel die praktische Anwendung des Rechnungsverfahrens erprobt.

1) Die Beanspruchung von gewundenen Drehungsfedern und Treppenwangen ist fast der einzige Gegenstand dieser Veröffentlichungen. Vgl. E. Bach, Elastizität und Festigkeit, H. Seipp, Beiträge zur Theorie und Berechnung doppelt gekrümmter Freiträger und verwandter Gebilde (Hartleben, Wien und Leipzig 1909), A. F. Zschetzsche, Handbuch der Baustatik, Band I, Art. 14 (A. Bagel, Düsseldorf 1912).

I. Entwicklung der Elastizitätsgleichungen.

Die Achse des in Abb. 1 dargestellten Bogenträgers ist als doppeltgekrümmte Kurve gestaltet. Das Tragwerk ist an den Kämpfern fest eingespannt und an verschiedenen Stellen durch beliebig gerichtete Kräfte P beansprucht. Um die räumliche Einspannung zu bewirken, sind sechs Widerstände erforderlich: drei Stützendrücke und drei Stützenmomente. Im ganzen treten an den beiden Kämpfern zwölf Auflagerwiderstände auf, denen gegenüber nur die sechs allgemeinen Bedingungen des räumlichen Gleichgewichtes stehen. Das Gebilde ist somit sechsfach unbestimmt. Um die Unbestimmtheit zu beseitigen, wird durch den Schnitt $i-k$ der Bogen in zwei einfache, statisch bestimmte Freiträger verwandelt (Abb. 2). Der feste Zusammenhang zwischen den abgeschnittenen Teilen wird wiederhergestellt, wenn die im Trennungsquerschnitt auftretenden inneren Spannungen durch solche Kräfte X, Y, Z und Kräftepaare ξ, η, ζ ersetzt werden, daß bei jedem Belastungsfalle die Formänderungen beider Freiträger an der Schnittstelle vollkommen übereinstimmen. Da zur Darstellung dieser Formänderungen im Raume die Er-

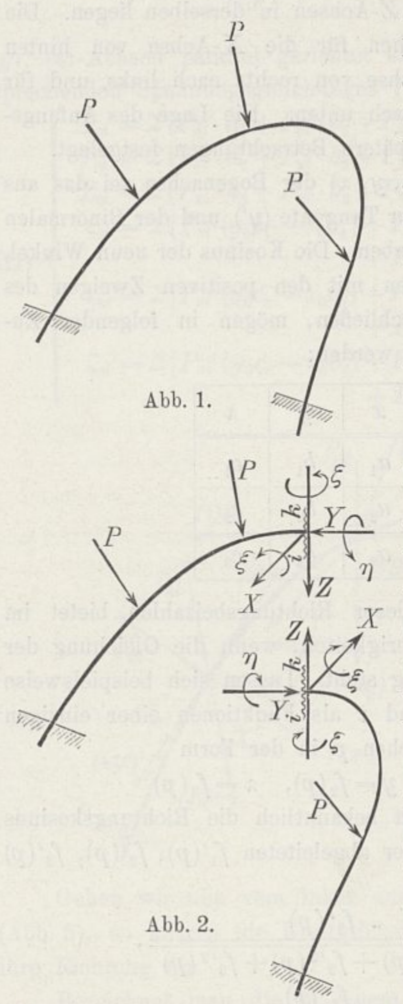


Abb. 1.

Abb. 2.

mittlung von drei Verschiebungen und von drei Winkeldrehungen erforderlich ist, so besteht zwischen den sechs Verschiebungsgrößen und den sechs Spannungsgrößen des Trennungsquerschnittes diejenige Anzahl von Beziehungen, die zur Kennzeichnung der Beanspruchung notwendig und hinreichend ist. Bevor wir die Elastizitätsgleichungen, welche diese Beziehungen ausdrücken, ableiten, müssen wir zunächst den Zusammenhang zwischen den Kräften $P, X, Y, Z, \xi, \eta, \zeta$ und den inneren Spannungen aller Teile des Tragwerkes erläutern.

§ 1. Untersuchung des Hauptsystems.

Betrachten wir zuerst den linken Freiträger (Abb. 3). Die Bogenachse möge auf ein rechtwinkliges Achsenkreuz

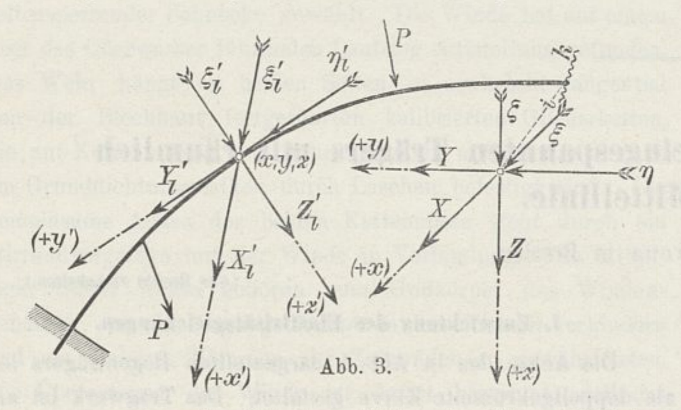


Abb. 3.

bezogen werden: die X-Achse steht senkrecht zur Bildebene, während die Y- und die Z-Achsen in derselben liegen. Die positiven Richtungen gehen für die X-Achse von hinten nach vorn, für die Y-Achse von rechts nach links und für die Z-Achse von oben nach unten. Die Lage des Anfangspunktes O wird durch spätere Betrachtungen festgelegt.

Für jeden Punkt (x, y, z) der Bogenachse sei das aus der Normalen (x'), aus der Tangente (y') und der Binormalen (z') bestehende Kreuz gegeben. Die Kosinus der neun Winkel, welche diese drei Achsen mit den positiven Zweigen des X-Y-Z-Achsenkreuzes schließen, mögen in folgender Zusammenstellung geordnet werden:

	x	y	z
x'	a_1	b_1	c_1
y'	a_2	b_2	c_2
z'	a_3	b_3	c_3

Die Bestimmung dieser Richtungsbeizahlen bietet im allgemeinen keine Schwierigkeiten, wenn die Gleichung der Bogenachse zur Verfügung steht. Lassen sich beispielsweise die Koordinaten x, y und z als Funktionen einer einzigen unabhängigen Veränderlichen p in der Form

$$1)\qquad x=f_1(p),\quad y=f_2(p),\quad z=f_3(p)$$

darstellen, so kann man bekanntlich die Richtungskosinus der Tangente mit Hilfe der abgeleiteten $f_1'(p)$, $f_2'(p)$, $f_3'(p)$ aus den Formeln

$$2)\quad \begin{cases} a_2=\dfrac{f_2'(p)}{\sqrt{f_1'^2(p)+f_2'^2(p)+f_3'^2(p)}}, \\ b_2=\dfrac{f_2'(p)}{\sqrt{f_1'^2(p)+f_2'^2(p)+f_3'^2(p)}}, \\ c_2=\dfrac{f_3'(p)}{\sqrt{f_1'^2(p)+f_2'^2(p)+f_3'^2(p)}} \end{cases}$$

erhalten. Um die Richtung der Binormalen zu ermitteln, müssen die Ausdrücke

$$3a)\quad \begin{cases} A=f_2'(p)\cdot f_3''(p)-f_3'(p)\cdot f_2''(p), \\ B=f_3'(p)\cdot f_1''(p)-f_1'(p)\cdot f_3''(p), \\ C=f_1'(p)\cdot f_2''(p)-f_2'(p)\cdot f_1''(p), \\ D=\sqrt{A^2+B^2+C^2} \end{cases}$$

errechnet werden. Sodann ergibt sich:

$$3b)\qquad a_3=\frac{A}{D},\quad b_3=\frac{B}{D},\quad c_3=\frac{C}{D}.$$

Die Lage der Normalen wird schließlich durch die Gleichungen

$$4)\quad a_1=b_2c_3-b_3\cdot c_2,\quad b_1=c_2a_3-c_3a_2,\quad c_1=a_2b_3-a_3b_2$$

festgelegt.[2])

Die Kenntnis der Achsen (x'), (y'), (z') ist insofern notwendig, als auf dieselben die Kraftgrößen, welche zur Darstellung der inneren Spannungen in jedem Querschnitt erforderlich sind und welche gewissermaßen als die **Kraftordinaten** des Tragwerkes aufgefaßt werden können, bezogen werden sollen. Für jeden Punkt (x, y, z) der Bogenachsen kommen nämlich zur Kennzeichnung der auftretenden inneren Widerstände sechs Kraftgrößen in Betracht: drei in Richtung der Normalen, Tangente und Binormalen fallende Kräfte X_l', Y_l', Z_l' und drei um diese Achsen drehende Kräftepaare ξ_l', η_l' und ζ_l'. X_l' und Z_l' stellen Querkräfte, ξ_l' und ζ_l' Biegungsmomente dar, während durch Y_l' eine Axialkraft und durch η_l' ein Verwindungsmoment angedeutet werden. Die Kräfte X_l', Y_l' und Z_l' werden als positiv angesehen, wenn ihr Wirkungssinn mit dem durch Pfeile gekennzeichneten positiven Richtungssinn des (x')-, (y')-, (z')-Achsenkreuzes übereinstimmt. Die Kräftepaare ξ_l', η_l' und ζ_l' werden als axiale Vektoren mit doppeltgefiederten Pfeilen dargestellt und mit dem positiven Vorzeichen versehen, wenn sie für das gegen die Pfeilspitze schauende Auge entgegengesetzt dem Sinne des Uhrzeigers um die entsprechenden Achsen drehen.

Wird der linke Freiträger nur durch die äußeren Kräfte P beansprucht, so entstehen Spannkräfte X_{ol}', Y_{ol}', Z_{ol}', ξ_{ol}', η_{ol}', ζ_{ol}', welche, da das Gebilde statisch bestimmt ist, ohne weiteres ermittelt werden können. Denkt man sich hingegen als einzige Belastung die Spannkräfte $X, Y, Z, \xi, \eta, \zeta$ der Schnittstelle vorhanden, so werden Spannkräfte X_{il}', Y_{il}', Z_{il}', ξ_{il}', η_{il}', ζ_{il}' hervorgerufen. Der wirkliche, endgültige Spannungszustand entspricht also den Grundgleichungen:

$$\text{I)}\quad X_l'=X_{ol}'+X_{il}';\quad Y_l'=Y_{ol}'+Y_{il}';\quad Z_l'=Z_{ol}'+Z_{il}';$$
$$\xi_l'=\xi_{ol}'+\xi_{il}';\quad \eta_l'=\eta_{ol}'+\eta_{il}';\quad \zeta_l'=\zeta_{ol}'+\zeta_{il}'.$$

Wir zeigen zunächst die Bestimmung der Werte X_{il}', $\xi_{il}'\ldots$, weil das gleiche Verfahren ohne weiteres auf die Ermittlung der Werte X_{ol}', $\xi_{ol}'\ldots$ übertragen werden kann.

Wir wählen den Koordinatenanfangspunkt O (Abb. 4) als Angriffspunkt der Spannkräfte der Schnittstelle, lassen die Kräfte X, Y, Z mit den Achsen (x), (y), (z) fallen und nehmen letztere zugleich als Drehachsen für die Kräftepaare ξ, η und ζ. Der positive Wirkungssinn möge hierbei durch die einfach- und doppeltgefiederten Pfeile festgelegt sein. Die Ordinaten des Punktes O in bezug auf das (x)-, (y)-, (z)-Achsenkreuz sind durch die Gleichungen

2) Die Richtung der Normalen, der Tangente und der Binormalen können auch unter Umständen auf zeichnerischem Wege genau oder näherungsweise bestimmt werden.

$$5)\quad x' = -(a_1 x + b_1 y + c_1 z),\quad y' = -(a_2 x + b_2 y + c_2 z),$$
$$z' = -(a_3 x + b_3 y + c_3 z)$$
gegeben.

Abb. 4.

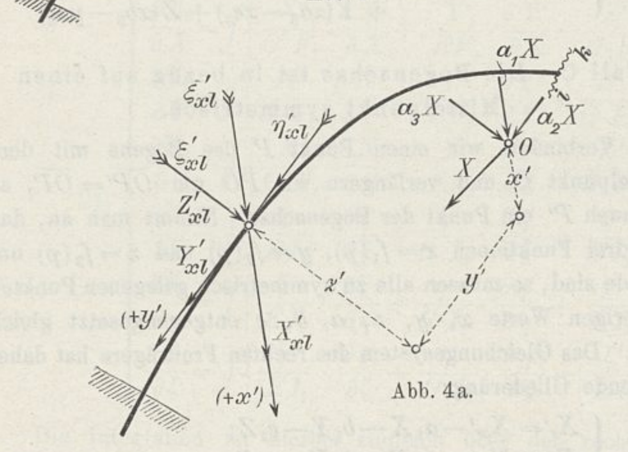


Abb. 4a.

Wäre die Kraft X allein vorhanden (Abb. 4a), so würden Spannkräfte

$$6)\quad \begin{cases} X_{xl}' = a_1 X; & \xi_{xl}' = X(y' a_3 - z' a_2); \\ Y_{xl}' = a_2 X; & \eta_{xl}' = X(z' a_1 - x' a_3); \\ Z_{xl}' = a_3 X; & \zeta_{xl}' = X(x' a_2 - y' a_1) \end{cases}$$

entstehen. Es ist nun:

$$y' a_3 - z' a_2 = a_2 (a_3 x + b_3 y + c_3 z) - a_3 (a_2 x + b_2 y + c_2 z)$$
$$= y (a_2 b_3 - a_3 b_2) - z (c_2 a_3 - c_3 a_2).$$

Und da bekanntlich

$$a_2 b_3 - a_3 b_2 = c_1, \quad c_2 a_3 - c_3 a_2 = b_1,$$

so ergibt sich auch

$$y' a_3 - z' a_2 = y c_1 - z b_1,$$

und auf Grund ähnlicher Entwicklungen:

$$z' a_1 - x' a_3 = y c_2 - z b_2, \quad x' a_2 - y' a_1 = y c_3 - z b_3.$$

Mithin erhält man:

$$6a)\quad \xi_{xl}' = X(y c_1 - z b_1); \quad \eta_{xl}' = X(y c_2 - z b_2);$$
$$\zeta_{xl}' = X(y c_3 - z b_3).$$

Durch sinngemäße Übertragung gelangt man für den Fall, daß Y bzw. Z allein wirken, zu folgenden Spannungswerten:

$$7)\quad \begin{cases} X_{yl}' = b_1 Y; & \xi_{yl}' = Y(z a_1 - x c_1); \\ Y_{yl}' = b_2 Y; & \eta_{yl}' = Y(z a_2 - x c_2); \\ Z_{yl}' = b_3 Y; & \zeta_{yl}' = Y(z a_3 - x c_3). \end{cases}$$

$$8)\quad \begin{cases} X_{zl}' = c_1 Z; & \xi_{zl}' = Z(x b_1 - y a_1); \\ Y_{zl}' = c_2 Z; & \eta_{zl}' = Z(x b_2 - y a_2); \\ Z_{zl}' = c_3 Z; & \zeta_{zl}' = Z(x b_3 - y a_3). \end{cases}$$

Unter dem Einfluß der Kräftepaare ξ, η und ζ entstehen der Reihe nach die Momente:

$$9)\quad \xi_{\xi l}' = a_1 \xi; \quad \eta_{\xi l}' = a_2 \xi; \quad \zeta_{\xi l}' = a_3 \xi; \quad \text{(Abb. 4b)}$$
$$10)\quad \xi_{\eta l}' = b_1 \eta; \quad \eta_{\eta l}' = b_2 \eta; \quad \zeta_{\eta l}' = b_3 \eta;$$
$$11)\quad \xi_{\zeta l}' = c_1 \zeta; \quad \eta_{\zeta l}' = c_2 \zeta; \quad \zeta_{\zeta l}' = c_3 \zeta.$$

Faßt man alle zugehörigen Werte zusammen, so ergibt sich insgesamt:

$$\text{II)}\quad \begin{cases} X_{il}' = a_1 X + b_1 Y + c_1 Z; \\ Y_{il}' = a_2 X + b_2 Y + c_2 Z; \\ Z_{il}' = a_3 X + b_3 Y + c_3 Z; \\ \xi_{il}' = a_1 \xi + b_1 \eta + c_1 \zeta + X(y c_1 - z b_1) \\ \qquad + Y(z a_1 - x c_1) + Z(x b_1 - y a_1); \\ \eta_{il}' = a_2 \xi + b_2 \eta + c_2 \zeta + X(y c_2 - z b_2) \\ \qquad + Y(z a_2 - x c_2) + Z(x b_2 - y a_2); \\ \zeta_{il}' = a_3 \xi + b_3 \eta + c_3 \zeta + X(y c_3 - z b_3) \\ \qquad + Y(z a_3 - x c_3) + Z(x b_3 - y a_3). \end{cases}$$

Zerlegt man schließlich jede auf dem linken Freiträger befindliche Kraft P_l in drei Teilkräfte P_{xl}', P_{yl}', P_{zl}' und legt man durch den jeweiligen Angriffspunkt ein rechtwinkliges Achsenkreuz, dessen Achsen (x_0), (y_0), (z_0) den (x),

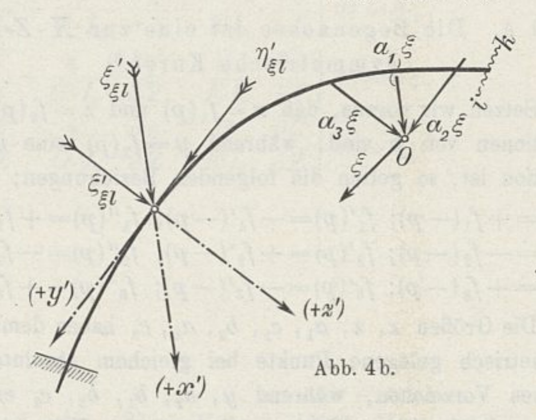


Abb. 4b.

(y), (z)-Achsen parallel gerichtet sind, so lauten die entsprechenden Spannungsgleichungen (Abb. 4c):

$$\text{III)}\quad \begin{cases} X_{ol}' = \Sigma(P_{xl}' \cdot a_1 + P_{yl}' \cdot b_1 + P_{zl}' \cdot c_1); \\ Y_{ol}' = \Sigma(P_{xl}' \cdot a_2 + P_{yl}' \cdot b_2 + P_{zl}' \cdot c_2); \\ Z_{ol}' = \Sigma(P_{xl}' \cdot a_3 + P_{yl}' \cdot b_3 + P_{zl}' \cdot c_3); \\ \xi_{ol}' = \Sigma[P_{xl}'(y_0 c_1 - z_0 b_1) + P_{yl}'(z_0 a_1 - x_0 c_1) \\ \qquad + P_{zl}'(x_0 b_1 - y_0 a_1)]; \\ \eta_{ol}' = \Sigma[P_{xl}'(y_0 c_2 - z_0 b_2) + P_{yl}'(z_0 a_2 - x_0 c_2) \\ \qquad + P_{zl}'(x_0 b_2 - y_0 a_2)]; \\ \zeta_{ol}' = \Sigma[P_{xl}'(y_0 c_3 - z_0 b_3) + P_{yl}'(z_0 a_3 - x_0 c_3) \\ \qquad + P_{zl}'(x_0 b_3 - y_0 a_3)]. \end{cases}$$

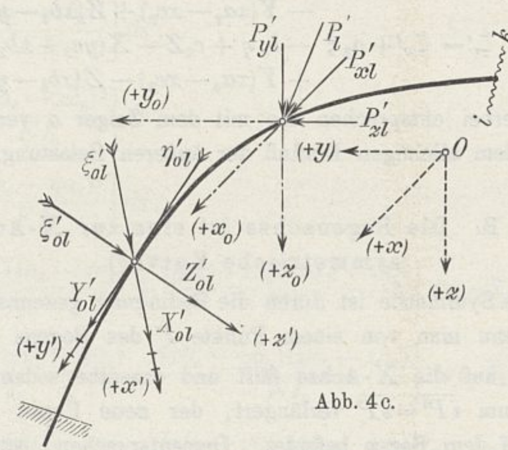


Abb. 4c.

Gehen wir nun vom linken zum rechten Freiträger über (Abb. 5), so kehren die Kraftgrößen X, Y, Z, ξ, η und ζ ihre Richtung um.

Bezeichnet man die in einem Querschnitte (x', y', z') auftretenden Spannkräfte mit X_r', Y_r', Z_r', ξ_r', η_r', ζ_r', so muß beachtet werden, daß auch bei diesen Vektoren der positive Wirkungssinn demjenigen der Vektoren X_l', Y_l', Z_l',

ξ_l', η_l', ζ_l' entgegengesetzt gerichtet ist. Um zu weitgehende Entwicklungen zu vermeiden, fassen wir sofort diejenigen Fälle ins Auge, welche für die Praxis in erster Linie von Belang sind. Je nach den Symmetriebedingungen, denen die Bogenachse genügt, sind folgende Hauptfälle zu unterscheiden.

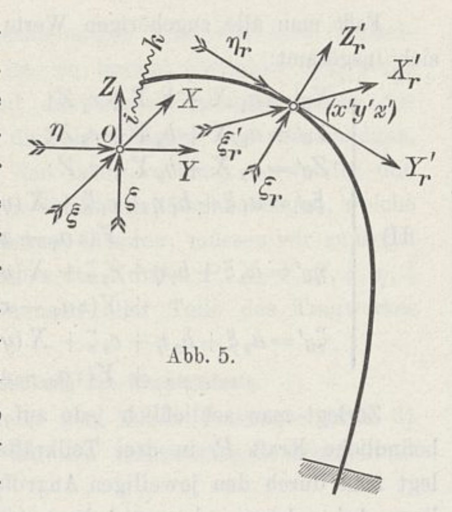


Abb. 5.

Fall A. Die Bogenachse ist eine zur X-Z-Ebene symmetrische Kurve.[3])

Setzen wir voraus, daß $x = f_1(p)$ und $z = f_3(p)$ gerade Funktionen von p sind, während $y = f_2(p)$ eine ungerade Funktion ist, so gelten die folgenden Beziehungen:

$$f_1(p) = +f_1(-p);\ f_1'(p) = -f_1'(-p);\ f_1''(p) = +f_1''(-p);$$
$$f_2(p) = -f_2(-p);\ f_2'(p) = +f_2'(-p);\ f_2''(p) = -f_2''(-p);$$
$$f_3(p) = +f_3(-p);\ f_3'(p) = -f_3'(-p);\ f_3''(p) = +f_3''(-p).$$

Die Größen x, z, a_1, c_1, b_2, a_3, c_3 haben demnach für symmetrisch gelegene Punkte bei gleichem absoluten Wert gleiches Vorzeichen, während y, a_2, b_1, b_3, c_2 entgegengesetzt gleich sind. Mithin genügt es, das Vorzeichen letzterer Werte umzuändern, um aus den Spannungsgleichungen des linken Trägerteiles diejenigen des rechten zu erhalten. Hierdurch gelangt man unmittelbar zu folgendem Gleichungssystem:

$$\text{IV}^{a})\ \left\{\begin{aligned}
X_r' &= X_{or}' + a_1 X - b_1 Y + c_1 Z;\\
Y_r' &= Y_{or}' - a_2 X + b_2 Y - c_2 Z;\\
Z_r' &= Z_{or}' + a_3 X - b_3 Y + c_3 Z;\\
\xi_r' &= \xi_{or}' + a_1 \xi - b_1 \eta + c_1 Z - X(yc_1 - zb_1)\\
&\quad + Y(za_1 - xc_1) - Z(xb_1 - ya_1);\\
\eta_r' &= \eta_{or}' - a_2 \xi + b_2 \eta - c_2 Z + X(yc_2 - zb_2)\\
&\quad - Y(za_2 - xc_2) + Z(xb_2 - ya_2);\\
\zeta_r' &= \zeta_{or}' + a_3 \xi - b_3 \eta + c_3 Z - X(yc_3 - zb_3)\\
&\quad + Y(za_3 - xc_3) - Z(xb_3 - ya_3).
\end{aligned}\right.$$

Hierbei entsprechen die mit dem Zeiger o versehenen Werte dem alleinigen Einfluß der äußeren Belastung.

Fall B. Die Bogenachse ist eine zur X-Achse symmetrische Kurve.[4])

Die Symmetrie ist durch die Bedingung gekennzeichnet, daß, wenn man von einem Punkte P des Bogens aus ein Lot $\overline{Pi}$ auf die X-Achse fällt und dasselbe sodann rückwärtig um $\overline{iP'} = \overline{iP}$ verlängert, der neue Punkt P' sich auch auf dem Bogen befindet. Dementsprechend setzen wir voraus, daß $x = f_1(p)$ eine gerade, $y = f_2(p)$ und $z = f_3(p)$ ungerade Funktionen von p sind. Auf Grund ähnlicher Überlegungen wie vorhin erkennt man, daß zu symmetrisch gelegenen Punkten Werte x, a_1, b_2, c_2, b_3, c_3 mit dem gleichen und Werte y, z, b_1, c_1, a_2, a_3 mit dem entgegengesetzten Vorzeichen gehören. Kehrt man das Vorzeichen letzterer Größen in den Gleichungen II) um, so lauten die neuen Spannungsgleichungen:

$$\text{IV}^{b})\ \left\{\begin{aligned}
X_r' &= X_{or}' + a_1 X - b_1 Y - c_1 Z;\\
Y_r' &= Y_{or}' - a_2 X + b_2 Y + c_2 Z;\\
Z_r' &= Z_{or}' - a_3 X + b_3 Y + c_3 Z;\\
\xi_r' &= \xi_{or}' + a_1 \xi - b_1 \eta - c_1 \zeta + X(yc_1 - zb_1)\\
&\quad - Y(za_1 - xc_1) - Z(xb_1 - ya_1);\\
\eta_r' &= \eta_{or}' - a_2 \xi + b_2 \eta + c_2 \zeta - X(yc_2 - zb_2)\\
&\quad + Y(za_2 - xc_2) + Z(xb_2 - ya_2);\\
\zeta_r' &= \zeta_{or}' - a_3 \xi + b_3 \eta + c_3 \zeta - X(yc_3 - zb_3)\\
&\quad + Y(za_3 - xc_3) + Z(xb_3 - ya_3).
\end{aligned}\right.$$

Fall C. Die Bogenachse ist in bezug auf einen Mittelpunkt symmetrisch.

Verbinden wir einen Punkt P des Bogens mit dem Mittelpunkt O und verlängern wir $\overline{PO}$ um $\overline{OP'} = \overline{OP}$, so ist auch P' ein Punkt der Bogenachse. Nimmt man an, daß die drei Funktionen $x = f_1(p)$, $y = f_2(p)$ und $z = f_3(p)$ ungerade sind, so müssen alle zu symmetrisch gelegenen Punkten gehörigen Werte x, y, z, a, b, c entgegengesetzt gleich sein. Das Gleichungssystem des rechten Freiträgers hat daher folgende Gliederung:

$$\text{IV}^{c})\ \left\{\begin{aligned}
X_r' &= X_{or}' - a_1 X - b_1 Y - c_1 Z;\\
Y_r' &= Y_{or}' - a_2 X - b_2 Y - c_2 Z;\\
Z_r' &= Z_{or}' - a_3 X - b_3 Y - c_3 Z;\\
\xi_r' &= \xi_{or}' - a_1 \xi - b_1 Y - c_1 \zeta + X(yc_1 - zb_1)\\
&\quad + Y(za_1 - xc_1) + Z(xb_1 - ya_1);\\
\eta_r' &= \eta_{or}' - a_2 \xi - b_2 Y - c_2 \zeta + X(yc_2 - zb_2)\\
&\quad + Y(za_2 - xc_2) + Z(xb_2 - ya_2);\\
\zeta_r' &= \zeta_{or}' - a_3 \xi - b_3 Y - c_3 \zeta + X(yc_3 - zb_3)\\
&\quad + Y(za_3 - xc_3) + Z(xb_3 - ya_3).
\end{aligned}\right.$$

Es sei noch allgemein hervorgehoben, daß, insofern die geometrischen Symmetriebedingungen erfüllt sind, die Gleichungssysteme IV) auch dann ihre Gültigkeit behalten, wenn die hinsichtlich der Funktionen f_1, f_2, f_3 getroffenen Vereinbarungen nicht mehr zutreffen.

Durch die Spannungsgleichungen II, III und IV sind alle Beziehungen zwischen den inneren Widerständen und den statisch unbestimmten Größen X, Y, Z, ξ, η, ζ klargelegt: die Ermittlung dieser Größen ist das nächste Ziel unserer Untersuchung.

§ 2. Beziehungen zwischen den Verschiebungen und den statisch unbestimmten Größen.

Schließt man jegliche Wärmeänderung aus, so lautet die Grundgleichung der inneren Formänderungsarbeit $\mathfrak{A}_i$ unseres Tragwerkes:

$$\text{V)}\ \mathfrak{A}_i = \tfrac{1}{2}\int\left[\frac{X'^2}{G\cdot F_1} + \frac{Y'^2}{EF_2} + \frac{Z'^2}{G\cdot F_3} + \frac{\xi'^2}{EI_1} + \frac{\eta'^2}{G\cdot I_2} + \frac{\zeta'^2}{EI_3}\right] ds.$$

Hierbei bedeuten:

G: das Gleitmaß des Baustoffes,

E: die Elastizitätsziffer des Baustoffes,

F_1, F_2, F_3, I_1, I_2, I_3: Funktionen der Querschnittsabmessungen.

3) Diese Bedingung wird von den wichtigsten im Bauwesen vorkommenden, gewundenen Trägern erfüllt. Insbesondere gilt sie für die Gurtbögen, welche die Durchdringung von Gewölben begrenzen.

4) Die Wangen gewundener Treppen sind meistens derartig gestaltet.

I_1 und I_3 stellen das Trägheitsmoment des Querschnittes in bezug auf die Normale (x') und die Binormale (z'), F_2 den Querschnittsinhalt dar.

Hat der Querschnitt keine einspringenden Ecken, so besteht zwischen F_1, F_2, F_3 die Beziehung $F_1 = \varkappa F_2 = F_3$. — Die unveränderliche Beizahl $\varkappa$ hängt nur von der Querschnittsgestalt ab. Für das Rechteck ist $\varkappa = \frac{5}{6}$ und für den Kreis $\varkappa = \frac{27}{32}$.

Bei I-förmigen Trägern nimmt man für F_1 den Steg- und für F_3 den Flanschquerschnitt oder umgekehrt, je nachdem der Steg in Richtung der (x')- oder in Richtung der (z')-Achse fällt.

I_2 kann als eine Art polaren Trägheitsmomentes aufgefaßt werden. Bei einfachen Querschnitten (Kreis, Ring, Ellipse, Rechteck) wird I_2 entweder nach der de Saint-Venantschen Formel[5] $I_2 = \frac{F_2^4}{40\,(I_1 + I_3)}$ oder nach der Grashofschen Formel $I_2 = \frac{I_1 \cdot I_3}{\psi\,(I_1 + I_3)}$ errechnet, wobei die Beizahl ψ, je nachdem die Querschnittsgestalt mehr oder weniger vom Kreis abweicht, zwischen $\frac{8}{3}$ und 4 schwankt. Eine einwandfreie Bestimmung von I_2 bei Querschnitten mit einspringenden Ecken ist, mit Ausnahme des Winkeleisens, zurzeit noch nicht erzielt worden.[6])

Bei Ausschließung jeglicher Widerlagerverschiebung lautet das Elastizitätsgleichungssystem des Tragwerkes:

$$\text{VI)}\quad \begin{cases} \dfrac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial X} = \displaystyle\int \left[\frac{X'}{G \cdot F_1} \cdot \frac{\partial X'}{\partial X} + \frac{Y'}{EF_2} \cdot \frac{\partial Y'}{\partial X} + \frac{Z'}{G \cdot F_3} \cdot \frac{\partial Z'}{\partial X} + \frac{\xi'}{EI_1} \cdot \frac{\partial \xi'}{\partial X} + \frac{\eta'}{G \cdot I_2} \cdot \frac{\partial \eta'}{\partial X} + \frac{\zeta'}{EI_3} \cdot \frac{\partial \zeta'}{\partial X} \right] ds = 0; \\ \dfrac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial Y} = \displaystyle\int \left[\frac{X'}{G \cdot F_1} \cdot \frac{\partial X'}{\partial Y} + \frac{Y'}{EF_2} \cdot \frac{\partial Y'}{\partial Y} + \frac{Z'}{G \cdot F_3} \cdot \frac{\partial Z'}{\partial Y} + \frac{\xi'}{EI_1} \cdot \frac{\partial \xi'}{\partial Y} + \frac{\eta'}{G \cdot I_2} \cdot \frac{\partial \eta'}{\partial Y} + \frac{\zeta'}{EI_3} \cdot \frac{\partial \zeta'}{\partial Y} \right] ds = 0; \\ \dfrac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial Z} = \displaystyle\int \left[\frac{X'}{G \cdot F_1} \cdot \frac{\partial X'}{\partial Z} + \frac{Y'}{EF_2} \cdot \frac{\partial Y'}{\partial Z} + \frac{Z'}{G \cdot F_3} \cdot \frac{\partial Z'}{\partial X} + \frac{\xi'}{EI_1} \cdot \frac{\partial \xi'}{\partial Z} + \frac{\eta'}{G \cdot I_2} \cdot \frac{\partial \eta'}{\partial Z} + \frac{\zeta'}{EI_3} \cdot \frac{\partial \zeta'}{\partial Z} \right] ds = 0; \\ \dfrac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial \xi} = \displaystyle\int \left[\frac{\xi'}{EI_1} \cdot \frac{\partial \xi'}{\partial \xi} + \frac{\eta'}{G \cdot I_2} \cdot \frac{\partial \eta'}{\partial \xi} + \frac{\zeta'}{EI_3} \cdot \frac{\partial \zeta'}{\partial \xi} \right] ds = 0; \\ \dfrac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial \eta} = \displaystyle\int \left[\frac{\xi'}{EI_1} \cdot \frac{\partial \xi'}{\partial \eta} + \frac{\eta'}{G \cdot I_2} \cdot \frac{\partial \eta'}{\partial \eta} + \frac{\zeta'}{EI_3} \cdot \frac{\partial \zeta'}{\partial \eta} \right] ds = 0; \\ \dfrac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial \zeta} = \displaystyle\int \left[\frac{\xi'}{EI_1} \cdot \frac{\partial \xi'}{\partial \zeta} + \frac{\eta'}{G \cdot I_2} \cdot \frac{\partial \eta'}{\partial \zeta} + \frac{\zeta'}{EI_3} \cdot \frac{\partial \zeta'}{\partial \zeta} \right] ds = 0. \end{cases}$$

Die Integration ist hierbei zugleich über den rechten und über den linken Freiträger zu erstrecken. Diese Gleichungen besagen, daß die Verschiebungen des Trennungsquerschnittes in Richtung der $(+x)$, $(+y)$, $(+z)$-Achsen, wie auch seine Drehungen um diese Achsen bei beiden Trägerhälften vollkommen übereinstimmen.

Der Gang der Entwicklung dieser Gleichungen möge zunächst für den Fall A (Symmetrie in bezug auf die X-Z-Ebene) gezeigt werden.

Die erste der Gleichungen VI liefert beispielsweise, wenn mit s die Bogenlänge einer Trägerhälfte bezeichnet wird:

$$\text{12)}\quad \begin{cases} \dfrac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial X} = \displaystyle\int_o^s \Bigg[a_1 \frac{(X_l' + X_r')}{G \cdot F_1} + a_2 \frac{(Y_l' - Y_r')}{EF_2} + a_3 \frac{(Z_l' + Z_r')}{G \cdot F_3} \\ \qquad + (yc_1 - z b_1) \dfrac{(\xi_l' - \xi_r')}{EI_1} + (yc_2 - z b_2) \dfrac{(\eta_l' + \eta_r')}{G \cdot I_2} \\ \qquad + (yc_3 - z b_3) \dfrac{(\zeta_l' - \zeta_r')}{EI_3} \Bigg] ds = 0. \end{cases}$$

Aus der vierten Gleichung geht ähnlich hervor:

$$\text{13)}\quad \frac{\partial \mathfrak{A}_i}{\partial \xi} = \int_o^s \left[a_1 \frac{(\xi_l' + \xi_r')}{EI_1} + a_2 \frac{(\eta_l' - \eta_r')}{G \cdot I_2} + a_3 \frac{(\zeta_l' + \zeta_r')}{EI_3} \right] ds = 0.$$

Wir ordnen die zusammengehörigen Integralwerte in die sechs folgenden Gruppen ein:

$$\text{14)}\quad \begin{cases} \delta_{xx} = \displaystyle\int_o^s \left[\frac{a_1^2}{GF_1} + \frac{a_2^2}{EF_2} + \frac{a_2^3}{GF_3} + \frac{(yc_1 - zb_1)^2}{EI_1} + \frac{(yc_2 - zb_2)^2}{GI_2} + \frac{(yc_3 - zb_3)^2}{EI_3} \right] ds; \\ \delta_{yy} = \displaystyle\int_o^s \left[\frac{b_1^2}{GF_1} + \frac{b_2^2}{EF_2} + \frac{b_3^2}{GF_3} + \frac{(za_1 - xc_1)^2}{EI_1} + \frac{(za_2 - xc_2)^2}{GI_2} + \frac{(za_3 - xc_3)^2}{EI_3} \right] ds; \\ \delta_{zz} = \displaystyle\int_o^s \left[\frac{c_1^2}{GF_1} + \frac{c_2^2}{EF_2} + \frac{c_3^2}{GF_3} + \frac{(xb_1 - ya_1)^2}{EI_1} + \frac{(xb_2 - ya_2)^2}{GI_2} + \frac{(xb_3 - ya_3)^2}{EI_3} \right] ds; \\ \delta_{xy} = \displaystyle\int_o^s \left[\frac{a_1 b_1}{GF_1} + \frac{a_2 b_2}{EF_2} + \frac{a_3 b_3}{GF_3} + \frac{(yc_1 - zb_1)(za_1 - xc_1)}{EI_1} + \frac{(yc_2 - zb_2)(za_2 - xc_2)}{GI_2} + \frac{(yc_3 - zb_3)(za_3 - zc_3)}{EI_3} \right] ds = \delta_{yx}; \\ \delta_{xz} = \displaystyle\int_o^s \left[\frac{a_1 c_1}{GF_1} + \frac{a_2 c_2}{EF_2} + \frac{a_3 c_3}{GF_3} + \frac{(yc_1 - zb_1)(xb_1 - ya_1)}{EI_1} + \frac{(yc_2 - zb_2)(xb_2 - ya_2)}{GI_2} + \frac{(xb_3 - ya_3)(yc_3 - zb_3)}{EI_3} \right] ds = \delta_{zx}; \\ \delta_{yz} = \displaystyle\int_o^s \left[\frac{b_1 c_1}{GF_1} + \frac{b_2 c_2}{EF_2} + \frac{b_3 c_3}{GF_3} + \frac{(xb_1 - ya_1)(za_1 - xc_1)}{EI_1} + \frac{(xb_2 - ya_2)(za_2 - xc_2)}{GI_2} + \frac{(xb_3 - ya_3)(za_3 - xc_3)}{EI_3} \right] ds = \delta_{zy}. \end{cases}$$

5) Vgl. de Saint-Venant, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 1879, Bd. 88. Die Brauchbarkeit dieser Formel ist durch die Versuche von Bauschinger und neuerdings auch durch die Versuche von Bretschneider für rechteckige Querschnitte bestätigt (Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1912, S. 253 u. 495).

6) Bezüglich des heutigen Standes der Verwindungstheorie verweisen wir auf die bekannten Lehrbücher von Föppl und von Bach und außerdem auf folgende neuere Veröffentlichungen:

a) Kötter, Über die Torsion des Winkeleisens. (Sitzungsberichte der Königlich preußischen Akademie der Wissenschaften, 1908);
b) Goetzke, Zur Theorie der Torsion rechteckig prismatischer Stäbe. (Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1909);
c) Busemann, Formänderung durch Verdrehung. (Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure, 1911);
d) Zschetzsche, Das Torsionsproblem und die Berechnung elastischer Erkerträger. (Österreichische Wochenschrift für den öffentlichen Baudienst, 1912).

15)
$$\omega_{\xi.\xi}=\int_o^s\left[\frac{a_1{}^2}{EI_1}+\frac{a_2{}^2}{GI_2}+\frac{a_3{}^2}{EI_3}\right]ds;\qquad \omega_{\xi.\eta}=\int_o^s\left[\frac{a_1 b_1}{EI_1}+\frac{a_2 b_2}{GI_2}+\frac{a_3 b_3}{EI_3}\right]ds=\omega_{\eta\xi};$$
$$\omega_{\eta.\eta}=\int_o^s\left[\frac{b_1{}^2}{EI_1}+\frac{b_2{}^2}{GI_2}+\frac{b_3{}^2}{EI_3}\right]ds;\qquad \omega_{\xi.\zeta}=\int_o^s\left[\frac{a_1 c_1}{EI_1}+\frac{a_2 c_2}{GI_2}+\frac{a_3 c_3}{EI_3}\right]ds=\omega_{\zeta\xi};$$
$$\omega_{\zeta.\zeta}=\int_o^s\left[\frac{c_1{}^2}{EI_1}+\frac{c_2{}^2}{GI_2}+\frac{c_3{}^2}{EI_3}\right]ds;\qquad \omega_{\eta.\zeta}=\int_o^s\left[\frac{b_1 c_1}{EI_1}+\frac{b_2 c_2}{GI_2}+\frac{b_3 c_3}{EI_3}\right]ds=\omega_{\zeta\eta}.$$

16)
$$\mu_{x.\xi}=\int_o^s\left[\frac{a_1(yc_1-zb_1)}{EI_1}+\frac{a_2(yc_2-zb_2)}{GI_2}+\frac{a_3(yc_3-zb_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\xi x};$$
$$\mu_{x.\eta}=\int_o^s\left[\frac{b_1(yc_1-zb_1)}{EI_1}+\frac{b_2(yc_2-zb_2)}{GI_2}+\frac{b_3(yc_3-zb_3)}{EI_2}\right]ds=\mu_{\eta x};$$
$$\mu_{x.\zeta}=\int_o^s\left[\frac{c_1(yc_1-zb_1)}{EI_1}+\frac{c_2(yc_2-zb_2)}{GI_2}+\frac{c_3(yc_3-zb_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\zeta x};$$
$$\mu_{y.\xi}=\int_o^s\left[\frac{a_1(za_1-xc_1)}{EI_1}+\frac{a_2(za_2-xc_2)}{GI_2}+\frac{a_3(za_3-xc_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\xi y};$$
$$\mu_{y.\eta}=\int_o^s\left[\frac{b_1(za_1-xc_1)}{EI_1}+\frac{b_2(za_2-xc_2)}{GI_2}+\frac{b_3(za_3-xc_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\eta y};$$
$$\mu_{y.\zeta}=\int_o^s\left[\frac{c_1(za_1-xc_1)}{EI_1}+\frac{c_2(za_2-xc_2)}{GI_2}+\frac{c_3(za_3-xc_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\zeta y};$$
$$\mu_{z.\xi}=\int_o^s\left[\frac{a_1(xb_1-ya_1)}{EI_1}+\frac{a_2(xb_2-ya_2)}{GI_2}+\frac{a_3(xb_3-ya_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\xi z};$$
$$\mu_{z.\eta}=\int_o^s\left[\frac{b_1(xb_1-ya_1)}{EI_1}+\frac{b_2(xb_2-ya_2)}{GI_2}+\frac{b_3(xb_3-ya_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\eta z};$$
$$\mu_{z.\zeta}=\int_o^s\left[\frac{c_1(xb_1-ya_1)}{EI_1}+\frac{c_2(xb_2-ya_2)}{GI_2}+\frac{c_3(xb_3-ya_3)}{EI_3}\right]ds=\mu_{\zeta z}.$$

17)
$$A_x=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{a_1(X_{ol}'+X_{or}')}{GF_1}+\frac{a_2(Y_{ol}'-Y_{or}')}{EF_2}+\frac{a_3(Z_{ol}'+Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(yc_1-zb_1)(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(yc_2-zb_2)(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(yc_3-zb_3)(\zeta_{ol}'-\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$A_y=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{b_1(X_{ol}'-X_{or}')}{GF_1}+\frac{b_2(Y_{ol}'+Y_{or}')}{EF_2}+\frac{b_3(Z_{ol}'-Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(za_1-xc_1)(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(za_2-xc_2)(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(za_3-xc_3)(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$A_z=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{c_1(X_{ol}'+X_{or}')}{GF_1}+\frac{c_2(Y_{ol}'-Y_{or}')}{EF_2}+\frac{c_3(Z_{ol}'+Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(xb_1-ya_1)(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(xb_2-ya_2)(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(xb_3-ya_3)(\zeta_{ol}'-\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$A_\xi=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{a_1(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{a_2(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{EI_2}+\frac{a_3(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$A_\eta=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{b_1(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{b_2(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{b_3(\zeta_{ol}'-\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$A_\zeta=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{c_1(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{c_2(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{c_3(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds.$$

18)
$$B_x=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{a_1(X_{ol}'+X_{or}')}{GF_1}+\frac{a_2(Y_{ol}'-Y_{or}')}{EF_2}+\frac{a_3(Z_{ol}'-Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(yc_1-zb_1)(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(yc_2-zb_2)(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(yc_3-zb_3)(\zeta_{ol}'-\zeta_{or})}{EI_3}\right]ds;$$
$$B_y=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{b_1(X_{ol}'-X_{or}')}{GF_1}+\frac{b_2(Y_{ol}'+Y_{or}')}{EF_2}+\frac{b_3(Z_{ol}'+Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(za_1-xc_1)(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{za_2-xc_2)(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(za_3-xc_3)(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$B_z=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{c_1(X_{ol}'-X_{or}')}{GF_1}+\frac{c_2(Y_{ol}'+Y_{or}')}{EF_2}+\frac{c_3(Z_{ol}'+Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(xb_1-ya_1)(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(xb_2-ya_2)(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(xb_3-ya_3)(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$B_\xi=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{a_1(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{a_2(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{a_3(\zeta_{ol}'-\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$B_\eta=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{b_1(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{b_2(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{b_3(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;$$
$$B_\zeta=-\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{c_1(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{c_2(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{c_3(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds.$$

$$
19)\left\{\begin{aligned}
C_x &= -\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{a_1(X_{ol}'-X_{or}')}{GF_1}+\frac{a_2(Y_{ol}'-Y_{or}')}{EF_2}+\frac{a_3(Z_{ol}'-Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(yc_1-zb_1)(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(yc_2-zb_2)(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(yc_3-zb_3)(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;\\
C_y &= -\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{b_1(X_{ol}'-X_{or}')}{GF_1}+\frac{b_2(Y_{ol}'-Y_{or}')}{EF_2}+\frac{b_3(Z_{ol}'-Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(za_1-xc_1)(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(za_2-xc_2)(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(za_3-xc_3)(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;\\
C_z &= -\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{c_1(X_{ol}'-X_{or}')}{GF_1}+\frac{c_2(Y_{ol}'-Y_{or}')}{EF_2}+\frac{c_3(Z_{ol}'-Z_{or}')}{GF_3}+\frac{(xb_1-ya_1)(\xi_{ol}'+\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{(xb_2-ya_2)(\eta_{ol}'+\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{(xb_3-ya_3)(\zeta_{ol}'+\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;\\
C_\xi &= -\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{a_1(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{a_2(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{a_3(\zeta_{ol}'-\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;\\
C_\eta &= -\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{b_1(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{b_2(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{b_3(\zeta_{ol}'-\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds;\\
C_\zeta &= -\tfrac{1}{2}\int_o^s\left[\frac{c_1(\xi_{ol}'-\xi_{or}')}{EI_1}+\frac{c_2(\eta_{ol}'-\eta_{or}')}{GI_2}+\frac{c_3(\zeta_{ol}'-\zeta_{or}')}{EI_3}\right]ds.
\end{aligned}\right.
$$

Unter δ und μ sind hierbei die durch Kräfte und Kräftepaare erzeugten Verschiebungen, unter ω die durch Momente verursachten Winkeldrehungen zu verstehen. Mit diesen Bezeichnungen liefern die Gleichungen 12) und 13) in Verbindung mit den Gleichungssystemen II), III) und IV[a]):

$$12^a)\qquad X\cdot\delta_{xx}+\eta\cdot\mu_{x\eta}+Z\cdot\delta_{xz}=A_x;$$

$$13^a)\qquad \xi\cdot\omega_{\xi\xi}+Y\cdot\mu_{\xi\cdot y}+\zeta\cdot\omega_{\xi\zeta}=A_\xi.$$

In ähnlicher Weise gelangt man durch Entwicklung aller Gleichungen VI) zu folgenden Beziehungen:

$$
VII^a)\left\{\begin{aligned}
&X\cdot\delta_{xx}+\eta\cdot\mu_{x\eta}+Z\cdot\delta_{xz} &&=A_x;\\
&X\cdot\mu_{x\eta}+\eta\cdot\omega_{\eta\eta}+Z\cdot\mu_{z\cdot\eta} &&=A_\eta;\\
&X\cdot\delta_{xz}+\eta\cdot\mu_{z\eta}+Z\cdot\delta_{zz} &&=A_z;\\
&\xi\cdot\omega_{\xi\xi}+Y\cdot\mu_{\xi\cdot y}+\zeta\cdot\omega_{\xi.\zeta} &&=A_\xi;\\
&\xi\cdot\mu_{\xi\cdot y}+Y\cdot\delta_{yy}+\zeta\cdot\mu_{\zeta\cdot y} &&=A_y;\\
&\xi\cdot\omega_{\xi.\zeta}+Y\cdot\mu_{\zeta\cdot y}+\zeta\cdot\omega_{\zeta.\zeta} &&=A_\zeta;
\end{aligned}\right\}\text{Fall A.}
$$

Das gleiche Verfahren liefert für den Fall B:

$$
VII^b)\left\{\begin{aligned}
&X\cdot\delta_{xx}+\xi\cdot\mu_{x\xi} &&=B_x;\\
&X\cdot\mu_{x\xi}+\xi\cdot\omega_{\xi\cdot\xi} &&=B_\xi;\\
&Y\cdot\delta_{yy}+Z\cdot\delta_{zy}+\eta\cdot\mu_{\eta.y}+\zeta\cdot\mu_{\zeta.y} &&=B_y;\\
&\eta\cdot\omega_{\eta\eta}+\zeta\cdot\omega_{\zeta\eta}+Y\cdot\mu_{\eta y}+Z\cdot\mu_{z\eta} &&=B_\eta;\\
&Y\cdot\delta_{zy}+Z\cdot\delta_{zz}+\eta\cdot\mu_{z.\eta}+\zeta\cdot\mu_{\zeta.z} &&=B_z;\\
&\eta\cdot\omega_{\zeta.\eta}+\zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta}+Y\cdot\mu_{\zeta.y}+Z\cdot\mu_{\zeta z} &&=B_\zeta;
\end{aligned}\right\}\text{Fall B.}
$$

Und für den Fall C:

$$
VII^c)\left\{\begin{aligned}
&X\cdot\delta_{xx}+Y\cdot\delta_{xy}+Z\cdot\delta_{xz} &&=C_x;\\
&X\cdot\delta_{xy}+Y\cdot\delta_{yy}+Z\cdot\delta_{zy} &&=C_y;\\
&X\cdot\delta_{xz}+Y\cdot\delta_{zy}+Z\cdot\delta_{zz} &&=C_z;\\
&\xi\cdot\omega_{\xi\xi}+\eta\cdot\omega_{\xi\eta}+\zeta\cdot\omega_{\xi\zeta} &&=C_\xi;\\
&\xi\cdot\omega_{\xi\eta}+\eta\cdot\omega_{\eta\eta}+\zeta\cdot\omega_{\zeta\eta} &&=C_\eta;\\
&\xi\cdot\omega_{\xi\zeta}+\eta\cdot\omega_{\zeta\eta}+\zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta} &&=C_\zeta;
\end{aligned}\right\}\text{Fall C.}
$$

Handelt es sich schließlich um ein Tragwerk, welches keinen Symmetriebedingungen unterworfen ist, so erhält man auf Grund der Spannungsgleichungen II) und III), indem man sich die Trennungsstelle mit dem rechten Trägerende zusammenfallend denkt:

$$
VIII)\left\{\begin{aligned}
&X\cdot\delta_{xx}+Y\cdot\delta_{xy}+Z\cdot\delta_{xz}+\xi\cdot\mu_{x\xi}+\eta\cdot\mu_{x\eta}+\zeta\cdot\mu_{x\zeta}=D_x;\\
&X\cdot\delta_{xy}+Y\cdot\delta_{yy}+Z\cdot\delta_{zy}+\xi\cdot\mu_{\xi y}+\eta\cdot\mu_{\eta y}+\zeta\cdot\mu_{\zeta y}=D_y;\\
&X\cdot\delta_{xz}+Y\cdot\delta_{zy}+Z\cdot\delta_{zz}+\xi\cdot\mu_{\xi z}+\eta\cdot\mu_{z.\eta}+\zeta\cdot\mu_{z\zeta}=D_z;\\
&X\cdot\mu_{x\xi}+Y\cdot\mu_{\xi y}+Z\cdot\mu_{\xi z}+\xi\cdot\omega_{\xi\xi}+\eta\cdot\omega_{\xi.\eta}+\zeta\cdot\omega_{\xi.\zeta}=D_\xi;\\
&X\cdot\mu_{x.\eta}+Y\cdot\mu_{\eta y}+Z\cdot\mu_{z.\eta}+\xi\cdot\omega_{\xi.\eta}+\eta\cdot\omega_{\eta\eta}+\zeta\cdot\omega_{\zeta.\eta}=D_\eta;\\
&X\cdot\mu_{x\zeta}+Y\cdot\mu_{\zeta.y}+Z\cdot\mu_{z.\zeta}+\xi\cdot\omega_{\xi.\zeta}+\eta\cdot\omega_{\zeta\eta}+\zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta}=D_\zeta.
\end{aligned}\right.
$$

$$
20)\left\{\begin{aligned}
D_x &= \int_o^s\left[\frac{a_1\cdot X_0'}{GF_1}+\frac{a_2\cdot Y_0'}{EF_2}+\frac{a_3\cdot Z_0'}{GF_3}+\frac{(yc_1-zb_1)\cdot\xi_0'}{EI_1}+\frac{(yc_2-zb_2)\cdot\eta_0'}{GI_2}+\frac{(yc_3-zb_3)\cdot\zeta_0'}{EI_3}\right]ds;\\
D_y &= \int_o^s\left[\frac{b_1\cdot X_0'}{GF_1}+\frac{b_2\cdot Y_0'}{EF_2}+\frac{b_3\cdot Z_0'}{GF_3}+\frac{(za_1-xc_1)\cdot\xi_0'}{EI_1}+\frac{(za_2-xc_2)\cdot\eta_0'}{GI_2}+\frac{(za_3-xc_3)\cdot\zeta_0'}{EI_3}\right]ds;\\
D_z &= \int_o^s\left[\frac{c_1\cdot X_0'}{GF_1}+\frac{c_2\cdot Y_0'}{EF_2}+\frac{c_3\cdot Z_0'}{GF_3}+\frac{(xb_1-ya_1)\cdot\xi_0'}{EI_1}+\frac{(xb_2-ya_2)\cdot\eta_0'}{GI_2}+\frac{(xb_3-ya_3)\cdot\zeta_0'}{EI_3}\right]ds;\\
D_\xi &= \int_o^s\left[\frac{a_1\cdot\xi_0'}{EI_1}+\frac{a_2\cdot\eta_0'}{GI_2}+\frac{a_3\cdot\zeta_0'}{EI_3}\right]ds;\\
D_\eta &= \int_o^s\left[\frac{b_1\cdot\xi_0'}{EI_1}+\frac{b_2\cdot\eta_0'}{GI_2}+\frac{b_3\cdot\zeta_0'}{EI_3}\right]ds;\\
D_\zeta &= \int_o^s\left[\frac{c_1\cdot\xi_0'}{EI_1}+\frac{c_2\cdot\eta_0'}{GI_2}+\frac{c_3\cdot\zeta_0'}{EI_3}\right]ds.
\end{aligned}\right.
$$

Hierbei ist die Integration über die Bogenlänge s des ganzen Tragwerkes zu erstrecken.

Die Hauptgleichungen VII) zerfallen, wie wir sehen, in zwei Gruppen, deren innere Gliederung den Symmetriebedingungen unmittelbar entspricht. Von besonderer Bedeutung ist die vollkommene Dualität zwischen Kräften (X, Y, Z) und Kräftepaaren (ξ, η, ζ), welche in allen Ausdrücken zutage tritt und im Verein mit den gesetzmäßigen Verknüpfungen zwischen geometrischen und statischen Größen die Auflösung der Gleichungen wesentlich vereinfacht.

Wir können nun aus diesen allgemeinen Elastizitätsbedingungen diejenigen ableiten, welche für die wichtigen Sonderfälle gelten und welche zugleich die Beziehungen zwischen den Formänderungsarten am übersichtlichsten zum Ausdruck bringen.

Es sei zunächst hervorgehoben, daß die Gleichungen VII^a) auch dann ihre Gültigkeit behalten, wenn die Bogenachse eine geschlossene Kurve ist. Voraussetzung ist nur, daß die äußere Belastung ein für sich im Gleichgewicht befindliches Kräftesystem bildet. Wenn in diesem Falle auch Symmetrie bezüglich der X-Y-Ebene vorhanden ist, so kann beiderseits dieser Ebene jedem Punkt mit den Ordinaten x, y, z, a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3 ein Punkt mit den Ordinaten x, y, $(-z)$, a_1, b_1, $(-c_1)$, $(-a_2)$, $(-b_2)$, c_2, a_3, b_3, $(-c_3)$ zugeordnet werden. Bei einem solchen Tragwerk werden

$$\delta_{xz} = \omega_{\xi\zeta} = \mu_{x\eta} = \mu_{\xi y} = \mu_{\zeta y} = 0.$$

Die entsprechenden Elastizitätsgleichungen lauten:

$$\text{IX)}\quad \begin{cases} X\cdot\delta_{xx} = A_x; \\ \eta\cdot\omega_{\eta\eta} + Z\cdot\mu_{z\eta} = A_\eta; \\ \eta\cdot\mu_{z\eta} + Z\cdot\delta_{zz} = A_z; \end{cases} \qquad \begin{cases} \xi\cdot\omega_{\xi\xi} = A_\xi; \\ Y\cdot\delta_{yy} = A_y; \\ \zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta} = A_\zeta. \end{cases}$$

Zu ähnlichen Gleichungen gelangt man, wenn die Bogenachse eine ebene Kurve ist. Nehmen wir beispielsweise an, daß die Bogenachse in der Y-Z-Ebene liegt (Abb. 6), so steht die Normale (x') senkrecht zur Bildebene, und es ergeben sich nebst dem Werte $x = 0$ die Richtungsbeizahlen $a_1 = 1$,

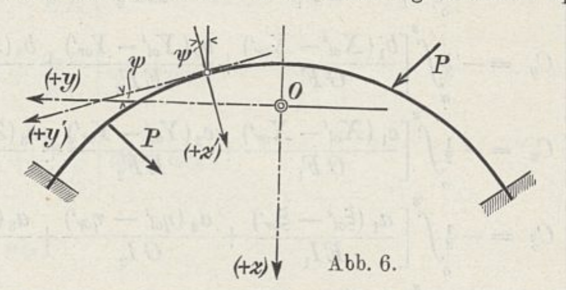


Abb. 6.

$b_1 = c_1 = 0$, $b_2 = -c_3 = \cos\psi$, $b_3 = -c_2 = \sin\psi$, $a_2 = a_3 = 0$.
Die Spannungsgleichungen III) und IV^a) gehen über in:

$$\text{X)}\quad \begin{cases} X' = X_0' + X; \\ Y' = Y_0' + b_2 Y \pm c_2 Z; \\ Z' = Z_0' \pm b_3 Y + c_3 Z; \\ \xi' = \xi_0' + \xi + Yz \mp Zy; \\ \eta' = \eta_0' + b_2\eta \pm c_2\zeta + X(yc_2 - zb_2); \\ \zeta' = \zeta_0' \pm b_3\eta + c_3\zeta \pm X(yc_3 - zb_3). \end{cases}$$

Hierbei gilt das obere Vorzeichen für die linke, das untere für die rechte Trägerhälfte. Wählt man den Koordinatenanfangspunkt derartig, daß die Bedingung $\int_o^s \frac{z\,ds}{EI_1} = 0$ erfüllt wird [7]), so erhält man:

$$21)\quad \begin{cases} \delta_{xx} = \int_o^s \left[\frac{1}{GF_1} + \frac{(yc_2 - zb_2)^2}{GI_2} + \frac{(yc_3 - zb_3)^2}{EI_3}\right] ds; \quad \delta_{yy} = \int_o^s \left[\frac{b_2^2}{EF_2} + \frac{b_3^2}{GF_3} + \frac{z^2}{EI_1}\right] ds; \quad \delta_{zz} = \int_o^s \left[\frac{c_2^2}{EF_2} + \frac{c_3^2}{GF_3} + \frac{y^2}{EI_1}\right] ds; \\ \delta_{zx} = \mu_{z\eta} = \mu_{\xi y} = \omega_{\xi\zeta} = \mu_{\zeta y} = 0; \quad \mu_{x\eta} = \int_o^s \left[\frac{b_2(yc_2 - zb_2)}{GI_2} + \frac{b_3(yc_3 - zb_3)}{EI_3}\right] ds; \\ \omega_{\xi\xi} = \int_o^s \frac{ds}{EI_1}; \quad \omega_{\eta\eta} = \int_o^s \left(\frac{b_2^2}{GI_1} + \frac{b_3^2}{EI_3}\right) ds; \quad \omega_{\zeta\zeta} = \int_o^s \left(\frac{c_2^2}{GI_2} + \frac{c_3^2}{EI_3}\right) ds, \end{cases}$$

und man gewinnt folgendes Gleichungssystem:

$$\text{XI)}\quad \begin{cases} X\cdot\delta_{xx} + \eta\cdot\mu_{x\eta} = A_x; \quad \xi\cdot\omega_{\xi\xi} = A_\xi; \\ X\cdot\mu_{x\eta} + \eta\cdot\omega_{\eta\eta} = A_\eta; \quad Y\cdot\delta_{yy} = A_y; \\ Z\cdot\delta_{zz} = A_z; \quad \zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta} = A_\zeta; \\ \text{wobei} \\ A_x = -\tfrac{1}{2}\int_o^s \left[\frac{X_{ol}' + X_{or}'}{GF_1} + \frac{(\eta_{ol}' + \eta_{or}')(yc_2 - zb_2)}{EI_2} + \frac{(\zeta_{ol}' - \zeta_{or}')(yc_3 - zb_3)}{GI_3}\right] ds; \quad A_\xi = -\tfrac{1}{2}\int_o^s \frac{(\xi_{ol}' + \xi_{or}')}{EI_1} ds; \\ A_y = -\tfrac{1}{2}\int_o^s \left[\frac{b_2(Y_{ol}' + Y_{or}')}{EF_2} + \frac{b_3(Z_{ol}' - Z_{or}')}{GF_3} + \frac{z(\xi_{ol}' + \xi_{or}')}{EI_1}\right] ds; \quad A_\eta = -\tfrac{1}{2}\int_o^s \left[\frac{b_2(\eta_{ol}' + \eta_{or}')}{GI_2} + \frac{b_3(\zeta_{ol}' - \zeta_{or}')}{EI_3}\right] ds; \\ A_z = -\tfrac{1}{2}\int_o^s \left[\frac{c_2(Y_{ol}' - Y_{or}')}{EF_2} + \frac{c_3(Z_{ol}' + Z_{or}')}{GF_3} - \frac{y(\xi_{ol}' - \xi_{or}')}{EI_1}\right] ds; \quad A_\zeta = -\tfrac{1}{2}\int_o^s \left[\frac{c_2(\eta_{ol}' - \eta_{or}')}{GI_2} + \frac{c_3(\zeta_{ol}' + \zeta_{or}')}{EI_3}\right] ds. \end{cases}$$

Diese Gleichungen stellen die allgemeinen Elastizitätsbedingungen für den elastischen, ebenen Bogenträger unter beliebigem Kraftangriff dar. [8])

P P O (+y) P (+z) P

Abb. 7.

8) Sie umfassen auch die Gleichungen des Erkerträgers und des eingespannten Gewölbes. Bezüglich dieser Trägerarten sei auf die bekannten Arbeiten von Koenen, Müller-Breslau, Pfeffer, Zschetzsche und insbesondere auf die erschöpfende Behandlung in der Schrift von Engesser, Das elastische Tonnengewölbe als räumliches System betrachtet (Zeitschr. für Bauwesen, 1909) hingewiesen.

Noch einfachere Ausdrücke ergeben sich, wenn das Tragwerk als ein bezüglich der Y- und der Z-Achse symmetrischer Ring gebildet ist (Abb. 7). Verlegt man den Koordinatenanfangspunkt in den geometrischen Mittelpunkt, so liefern die Gleichungen IX):

$$\text{IX}^a)\quad \begin{cases} X\cdot\delta_{xx} = A_x; \\ Y\cdot\delta_{yy} = A_y; \\ Z\cdot\delta_{zz} = A_z; \end{cases} \qquad \begin{cases} \xi\cdot\omega_{\xi\xi} = A_\xi; \\ \eta\cdot\omega_{\eta\eta} = A_\eta; \\ \zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta} = A_\zeta. \end{cases}$$

Die bisher aufgestellten Beziehungen sind ohne jegliche einschränkende Voraussetzung über die Querschnittsgestaltung abgeleitet worden. Es bleibt uns noch zu zeigen übrig, wie

7) Diese Bedingung wird im § 3 näher erläutert.

durch die Wahl geeigneter Annahmen über die Querschnittsverhältnisse ein für die Praxis sehr gut brauchbares Näherungsverfahren gewonnen werden kann.

§ 3. Näherungsverfahren.

Da im allgemeinen der Einfluß der Querschnittsveränderlichkeit kein ausschlaggebender ist, so darf für die Voruntersuchung

$$GF_1 = EF_2 = GF_3 = GF, \quad EI_1 = GI_2 = EI_3 = EI$$

gesetzt werden; F und I stellen hierbei Mittelwerte dar. Beachtet man die zwischen den Richtungsbeizahlen bestehenden Beziehungen:

$$\begin{array}{ll} a_1^2 + a_2^2 + a_3^2 = 1, & a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3 = 0, \\ b_1^2 + b_2^2 + b_3^2 = 1, & a_1 c_1 + a_2 c_2 + a_3 c_3 = 0, \\ c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1, & b_1 c_1 + b_2 c_2 + b_3 c_3 = 0, \end{array}$$

und schreibt man zur Abkürzung:

$$s_x^2 = y^2 + z^2, \quad s_y^2 = z^2 + x^2, \quad s_z^2 = x^2 + y^2,$$

so erhält man:

$$22)\left\{\begin{array}{l} \delta_{xx} = \int\limits_o^s \left(\frac{1}{GF} + \frac{s_x^2}{EI}\right) ds; \quad \delta_{yy} = \int\limits_o^s \left(\frac{1}{GF} + \frac{s_y^2}{EI}\right) ds; \\ \delta_{zz} = \int\limits_o^s \left(\frac{1}{GF} + \frac{s_z^2}{EI}\right) ds; \quad \omega_{\xi\xi} = \omega_{\eta\eta} = \omega_{\zeta\zeta} = \int\limits_o^s \frac{ds}{EI}; \\ \delta_{xy} = -\int\limits_o^s xy \frac{ds}{EI}; \quad \delta_{xz} = -\int\limits_o^s xz \frac{ds}{EI}; \\ \delta_{yz} = -\int\limits_o^s yz \frac{ds}{EI}; \quad \omega_{\xi\eta} = \omega_{\xi\zeta} = \omega_{\eta\zeta} = 0; \\ \mu_{x\xi} = \mu_{y\eta} = \mu_{z\zeta} = 0; \quad \mu_{y\zeta} = -\mu_{z\eta} = -\int\limits_o^s x \frac{ds}{EI}; \\ \mu_{z\xi} = -\mu_{\zeta x} = -\int\limits_o^s y \frac{ds}{EI}; \quad \mu_{x\eta} = -\mu_{y\xi} = -\int\limits_o^s z \frac{ds}{EI}. \end{array}\right.$$

Die weitere Behandlung ist nun für die drei Symmetriebedingungen verschieden.

Fall A. Die Bogenachse sei zunächst auf ein rechtwinkliges u, v, w-Achsenkreuz bezogen, dessen u- und w-Achsen in der Symmetrieebene liegen und dessen Anfangspunkt bezüglich des x, y, z-Achsenkreuzes die Ordinaten $x^0 = -\varkappa$, $y^0 = 0$, $z^0 = -\lambda$ haben möge. Der Winkel, welchen die u- (bzw. die w-) Achse mit der x- (bzw. die z-) Achse schließt, werde mit φ bezeichnet. Zwischen den beiden Achsenkreuzen bestehen die folgenden Beziehungen:

$$23)\left\{\begin{array}{l} x = (u - \varkappa)\cos\varphi + (w - \lambda)\sin\varphi; \\ y = v; \\ z = -(u - \varkappa)\sin\varphi + (w - \lambda)\cos\varphi. \end{array}\right.$$

Wählt man nun

$$\varkappa = \frac{\int\limits_o^s u \frac{ds}{EI}}{\int\limits_o^s \frac{ds}{EI}}, \quad \lambda = \frac{\int\limits_o^s w \cdot \frac{ds}{EI}}{\int\limits_o^s \frac{ds}{EI}},$$

$$\operatorname{tang}(2\varphi) = 2 \cdot \frac{\int\limits_o^s (u - \varkappa)(w - \lambda) \frac{ds}{EI}}{\int\limits_o^s [(u - \varkappa)^2 - (w - \lambda)^2] \frac{ds}{EI}},$$

so folgt sofort:

$$\int\limits_o^s x \frac{ds}{EI} = \int\limits_o^s z \frac{ds}{EI} = \int\limits_o^s xz \frac{ds}{EI} = 0.$$

Die Gleichungen VII[a]) gehen sodann über in XII[a]):

$$\text{XII}^a)\left\{\begin{array}{l} X \cdot \delta_{xx} = A_x = -\frac{1}{2}\Sigma\int\limits_o^{s_0} \left[(P_{xl}' - P_{xr}')\left(\frac{1}{GF} + \frac{y \cdot y_0 + z \cdot z_0}{EI}\right) - (P_{yl}' + P_{yr}') \cdot \frac{x_0 y}{EI} - (P_{zl}' - P_{zr}') \frac{x_0 z}{EI}\right] ds; \\ Y \cdot \delta_{yy} = A_y = -\frac{1}{2}\Sigma\int\limits_o^{s_0} \left[(P_{yl}' - P_{yr}')\left(\frac{1}{GF} + \frac{z \cdot z_0 + x \cdot x_0}{EI}\right) - (P_{zl}' + P_{zr}') \cdot \frac{y_0 z}{EI} - (P_{xl}' + P_{xr}') \frac{y_0 x}{EI}\right] ds; \\ Z \cdot \delta_{zz} = A_z = -\frac{1}{2}\Sigma\int\limits_o^{s_0} \left[(P_{zl}' - P_{zr}')\left(\frac{1}{GF} + \frac{x \cdot x_0 + y \cdot y_0}{EI}\right) - (P_{xl}' - P_{xr}') \cdot \frac{z_0 x}{EI} - (P_{yl}' + P_{yr}') \frac{z_0 y}{EI}\right] ds; \\ \xi \cdot \omega_{\xi\xi} = A_\xi = -\frac{1}{2}\Sigma\int\limits_o^{s_0} \left[(P_{yl}' - P_{yr}') \cdot \frac{z_0}{EI} - (P_{zl}' + P_{zr}') \cdot \frac{y_0}{EI}\right] ds; \\ \eta \cdot \omega_{\eta\eta} = A_\eta = -\frac{1}{2}\Sigma\int\limits_o^{s_0} \left[(P_{zl}' - P_{zr}') \cdot \frac{x_0}{EI} - (P_{xl}' - P_{xr}') \cdot \frac{z_0}{EI}\right] ds; \\ \zeta \cdot \omega_{\zeta\zeta} = A_\zeta = -\frac{1}{2}\Sigma\int\limits_o^{s_0} \left[(P_{xl}' + P_{xr}') \cdot \frac{y_0}{EI} - (P_{yl}' - P_{yr}') \cdot \frac{x_0}{EI}\right] ds. \end{array}\right.$$

P_x', P_y', P_z' stellen hierbei die Teilkräfte der äußeren Belastung in Richtung der positiven Zweige des x, y, z-Achsenkreuzes dar. Durch die Zeiger r und l werden die der rechten, bzw. der linken Trägerhälfte gehörigen Belastungen unterschieden. Die Integrationen der Belastungsglieder A sind auf die Bogenlänge s_0 zwischen dem jeweiligen Kraftangriffspunkt und dem nächsten Kämpfer auszudehnen. Das x_0, y_0, z_0-Achsenkreuz ist dem x, y, z-Koordinatensystem parallel: sein Ursprung fällt mit dem Angriffspunkt der entsprechenden Kraft P zusammen.

Fall B. Es werde jetzt gesetzt:

$$24)\left\{\begin{array}{l} x = u - \varkappa, \\ y = v\cos\varphi + w\sin\varphi, \\ x = -v\sin\varphi + w\cos\varphi. \end{array}\right.$$

Wir wählen für $\varkappa$ und φ die Werte

$$\varkappa = \frac{\int\limits_o^s u \frac{ds}{EI}}{\int\limits_o^s \frac{ds}{EI}}, \quad \operatorname{tang}(2\varphi) = 2\,\frac{\int\limits_o^s v \cdot w \cdot \frac{ds}{EI}}{\int\limits_o^s (v^2 - w^2) \frac{ds}{EI}}$$

und erfüllen somit die Bedingungen $\int\limits_o^s x \frac{ds}{EI} = \int\limits_o^s yz \cdot \frac{ds}{EI} = 0.$

Das Gleichungssystem VII[b]) liefert dementsprechend:

$$\text{XII}^{b})\left\{\begin{aligned}
X\cdot\delta_{xx} &= B_x = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{xl}'-P_{xr}')\left(\frac{1}{GF}+\frac{y\cdot y_0+z\cdot z_0}{EI}\right)-(P_{yl}'+P_{yr}')\cdot\frac{x_0\,y}{EI}-(P_{zl}'+P_{zr}')\cdot\frac{x_0\,z}{EI}\right]ds;\\
Y\cdot\delta_{yy} &= B_y = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{yl}'-P_{yr}')\left(\frac{1}{GF}+\frac{z\cdot z_0+x\cdot x_0}{EI}\right)-(P_{zl}'-P_{zr}')\cdot\frac{y_0\,z}{EI}-(P_{xl}'+P_{xr}')\cdot\frac{y_0\,x}{EI}\right]ds;\\
Z\cdot\delta_{zz} &= B_z = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{zl}'-P_{zr}')\left(\frac{1}{GF}+\frac{x\cdot x_0+y\cdot y_0}{EI}\right)-(P_{xl}'+P_{xr}')\cdot\frac{z_0\,x}{EI}-(P_{yl}'-P_{yr}')\cdot\frac{z_0\,y}{EI}\right]ds;\\
\xi\cdot\omega_{\xi\xi} &= B_\xi = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{yl}'+P_{yr}')\cdot\frac{z_0}{EI}-(P_{zl}'+P_{zr}')\cdot\frac{y_0}{EI}\right]ds;\\
\eta\cdot\omega_{\eta\eta} &= B_\eta = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{zl}'-P_{zr}')\cdot\frac{x_0}{EI}-(P_{xl}'+P_{xr}')\cdot\frac{z_0}{EI}\right]ds;\\
\zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta} &= B_\zeta = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{xl}'+P_{xr}')\cdot\frac{y_0}{EI}-(P_{yl}'-P_{yr}')\cdot\frac{x_0}{EI}\right]ds.
\end{aligned}\right.$$

Fall C. Wir stellen folgende Beziehungen auf:

$$25)\quad\left\{\begin{aligned}
x &= (u-\varkappa_1)-\lambda_1,\\
y &= (v-\varkappa_2)-\lambda_2,\\
z &= (w-\varkappa_3)-\lambda_3.
\end{aligned}\right.$$

Über die unveränderlichen Größen $\varkappa_1$, $\varkappa_2$, $\varkappa_3$, λ_1, λ_2, λ_3 soll derartig verfügt werden, daß sowohl die Gleichungen

$$\int_0^s\frac{xy\,ds}{EI}=\int_0^s xz\frac{ds}{EI}=\int_0^s yz\frac{ds}{EI}=0,$$

als auch die Gleichungen

$$\int_0^s(u-\varkappa_1)\frac{ds}{EI}=\int_0^s(v-\varkappa_2)\frac{ds}{EI}=\int_0^s(w-\varkappa_3)\frac{ds}{EI}=0$$

befriedigt werden. Setzt man:

$$\frac{\int_0^s v\cdot\frac{ds}{EI}\cdot\int_0^s w\cdot\frac{ds}{EI}-\int_0^s vw\cdot\frac{ds}{EI}\cdot\int_0^s\frac{ds}{EI}}{\left(\int_0^s\frac{ds}{EI}\right)^2}=K_1,$$

$$\frac{\int_0^s w\cdot\frac{ds}{EI}\cdot\int_0^s u\cdot\frac{ds}{EI}-\int_0^s wu\cdot\frac{ds}{EI}\cdot\int_0^s\frac{ds}{EI}}{\left(\int_0^s\frac{ds}{EI}\right)^2}=K_2,$$

$$\frac{\int_0^s u\cdot\frac{ds}{EI}\cdot\int_0^s v\cdot\frac{ds}{EI}-\int_0^s uv\cdot\frac{ds}{EI}\cdot\int_0^s\frac{ds}{EI}}{\left(\int_0^s\frac{ds}{EI}\right)^2}=K_3,$$

und wählt man für die Beizahlen $\varkappa$ und λ die Werte

$$\varkappa_1=\frac{\int_0^s u\frac{ds}{EI}}{\int_0^s\frac{ds}{EI}},\quad \varkappa_2=\frac{\int_0^s v\frac{sd}{EI}}{\int_0^s\frac{ds}{EI}},\quad \varkappa_3=\frac{\int_0^s w\frac{sd}{EI}}{\int_0^s\frac{ds}{EI}},\quad \lambda_1=\sqrt{\frac{K_2\cdot K_3}{K_1}},\quad \lambda_2=\sqrt{\frac{K_3\cdot K_1}{K_2}},\quad \lambda_3=\sqrt{\frac{K_1\cdot K_2}{K_3}},$$

so läßt sich leicht nachweisen, daß die obigen Bedingungen erfüllt werden.

Aus dem Gleichungssystem VII[c]) ergibt sich schließlich:

$$\text{XII}^{c})\left\{\begin{aligned}
X\cdot\delta_{xx} &= C_x = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{xl}'-P_{xr}')\left(\frac{1}{GF}+\frac{y\cdot y_0+z\cdot z_0}{EI}\right)-(P_{yl}'-R_{yr}')\cdot\frac{x_0\,y}{EI}-(P_{zl}'-P_{zr}')\cdot\frac{x_0\,z}{EI}\right]ds;\\
Y\cdot\delta_{yy} &= C_y = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{yl}'-P_{yr}')\left(\frac{1}{GF}+\frac{z\cdot z_0+x\cdot x_0}{EI}\right)-(P_{zl}'-P_{zr}')\cdot\frac{y_0\,z}{EI}-(P_{xl}'-P_{xr}')\cdot\frac{y_0\,z}{EI}\right]ds;\\
Z\cdot\delta_{zz} &= C_z = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{zl}'-P_{zr}')\left(\frac{1}{GF}+\frac{x\cdot x_0+y\cdot y_0}{EI}\right)-(P_{xl}'-P_{xr}')\cdot\frac{z_0\,x}{EI}-(P_{yl}'-P_{yr}')\cdot\frac{z_0\,y}{EI}\right]ds;\\
\xi\cdot\omega_{\xi\xi} &= C_\xi = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{yl}'+P_{yr}')\cdot\frac{z_0}{EI}-(P_{zl}'+P_{zr}')\cdot\frac{y_0}{EI}\right]ds;\\
\eta\cdot\omega_{\eta\eta} &= C_\eta = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{zl}'+P_{zr}')\cdot\frac{x_0}{EI}-(P_{xl}'+P_{xr}')\cdot\frac{z_0}{EI}\right]ds;\\
\zeta\cdot\omega_{\zeta\zeta} &= C_\zeta = -\tfrac{1}{2}\Sigma\int_0^s\left[(P_{xl}'+P_{xr}')\cdot\frac{y_0}{EI}-(P_{yl}'+P_{yr}')\cdot\frac{x_0}{EI}\right]ds.
\end{aligned}\right.$$

Bemerkung. Durch ähnliche Umwandlungen der Koordinaten könnte man auch das allgemeine Gleichungssystem VII so gestalten, daß es nur Gleichungen mit je einer Unbekannten enthalten würde. Da jedoch die Richtungsbeizahlen a, b, c in den Bestimmungsgleichungen des neuen Achsenkreuzes vorkommen, so würde die Auflösung der letzteren erhebliche Schwierigkeiten bereiten und daher kaum lohnend sein.[9])

§ 4. Einfluß der Wärme.

Wir setzen solche Wärmeänderungen voraus, daß ursprünglich ebene Querschnitte auch nach der Verformung eben bleiben. Diese Bedingung wird erfüllt, wenn die Wärmeänderung t jedes Punktes eines Querschnittes (x, y, z) der Gleichung

$$26)\qquad t = t_0 + \frac{t_x}{h_x}\cdot x' + \frac{t_z}{h_z}\cdot z'$$

genügt. Die Bedeutung von t_0, t_x, h_x, t_z, h_z ist hierbei aus Abb. 8 ersichtlich. Positive Werte t_0, t_x, t_z entsprechen einer Wärmezunahme.

Denken wir uns aus dem Tragwerk ein Volumenelement, welches durch zwei um dy' voneinander entfernte Querschnitte begrenzt ist, abgetrennt, so würden sich seine Fasern, wenn der Baustoff die Ausdehnungsziffer ε hat, infolge des Wärmeeinflusses um $\varepsilon t dy'$ dehnen. Die gegenseitige Bewegung der Begrenzungsquerschnitte könnte sodann in eine Verschiebung in Richtung der Y'-Achse: $\triangle\delta_y = -\varepsilon t_0 dy' = -\varepsilon t_0 ds$, in eine Drehung um die X'-Achse: $\triangle\omega_x = \frac{\varepsilon t_z ds}{h_z}$, und in eine Drehung um die Z'-Achse: $\triangle\omega_z = \frac{\varepsilon t_x ds}{h_x}$ zerlegt werden.

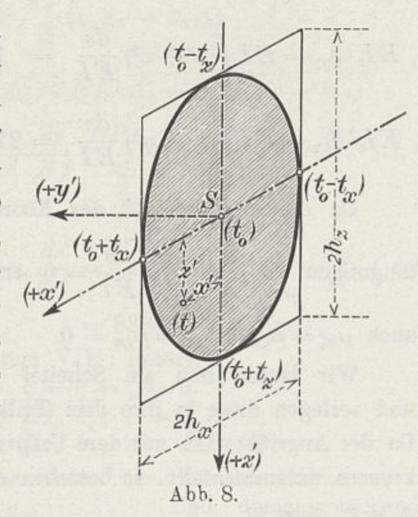


Abb. 8.

Infolge des Zusammenhanges mit dem ganzen Tragwerk tritt zu dieser Formänderung noch diejenige, welche durch die inneren Spannkräfte X_t, Y_t, Z_t, ξ_t, η_t, ζ_t erzeugt wird, hinzu. Werden beide Formänderungen zusammengesetzt und mit den entsprechenden Spannungen vervielfacht, so ergibt sich als Maß der inneren Formänderungsarbeit der Ausdruck

$$\text{XIII)}\quad \mathfrak{A}_{it} = \tfrac{1}{2}\int\left[\frac{X_t'^2}{GF_1} + \frac{Y_t'^2}{EF_2} + \frac{Z_t'^2}{GF_3} + \frac{\xi_t'^2}{EI_1} + \frac{\eta_t'^2}{GI_2} + \frac{\zeta_t'^2}{EI_3}\right] ds$$
$$\mp \varepsilon\int\left[t_0\cdot Y_t' - \frac{t_z}{h_z}\cdot\xi_t' - \frac{t_x}{h_x}\cdot\zeta_t'\right] ds.$$

Das obere Vorzeichen gilt hierbei für eine Wärmeerhöhung, das untere für eine Wärmeerniedrigung.

Stellt man auch die Bedingungen

$$\text{XIV)}\quad \frac{\partial\mathfrak{A}_{it}}{\partial X_t} = \frac{\partial\mathfrak{A}_{it}}{\partial Y_t} = \frac{\partial\mathfrak{A}_{it}}{\partial Z_t} = \frac{\partial\mathfrak{A}_{it}}{\partial \xi_t} = \frac{\partial\mathfrak{A}_{it}}{\partial \eta_t} = \frac{\partial\mathfrak{A}_{it}}{\partial \zeta_t} = 0$$

auf, so gelangt man wieder zu den Elastizitätsgleichungen VII). Es treten nur in den Belastungsgliedern an die Stelle der Spannkräfte X_0', Y_0', Z_0', ξ_0', η_0', ζ_0' die Werte:

$$Y_{ot}' = \mp EF_2\,\varepsilon t_0\,,\quad \xi_{ot}' = \pm EI_1\cdot\varepsilon\frac{t_z}{h_z},\quad \eta_{ot}' = \pm EI_3\cdot\varepsilon\frac{t_x}{h_x}.$$

Ist auch hinsichtlich der Wärmeverteilung Symmetrie vorhanden, so ergibt sich insbesondere

α) im Falle A:

$$\text{XV}^{a}\ \begin{cases} A_{xt} = A_{\eta t} = A_{zt} = 0;\quad A_{\xi t} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[a_1\cdot\frac{t_z}{h_z} + a_3\cdot\frac{t_x}{h_x}\right] ds;\\ A_{yt} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[-t_0 b_2 + \frac{t_z}{h_z}(za_1 - xc_1) + \frac{t_x}{h_x}(za_3 - xc_3)\right] ds;\\ A_{\zeta t} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[c_1\cdot\frac{t_z}{h_z} + c_3\cdot\frac{t_x}{h_x}\right] ds\,; \end{cases}$$

β) im Falle B:

$$\text{XV}^{b})\ \begin{cases} B_{xt} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\cdot\frac{t_z}{h_z}(yc_1 - zb_1) ds;\quad B_{\xi t} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\cdot a_1\cdot\frac{t_z}{h_z} ds;\\ B_{yt} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[-t_0 b_2 + \frac{t_x}{h_x}(za_3 - xc_3)\right] ds\,;\\ B_{\eta t} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\cdot b_3\cdot\frac{t_x}{h_x} ds\,;\\ B_{zt} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[-t_0 c_2 + \frac{t_x}{h_x}(xb_3 - ya_3)\right] ds\,;\\ B_{\zeta t} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\cdot c_3\cdot\frac{t_x}{h_x} ds\,; \end{cases}$$

γ) im Falle C:

$$\text{XV}^{c})\ \begin{cases} C_{xt} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[\frac{t_z}{h_z}(yc_1 - zb_1) + \frac{t_x}{h_x}(yc_3 - zb_3)\right] ds;\quad C_{\xi t} = 0;\\ C_{yt} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[\frac{t_z}{h_z}(za_2 - xc_1) + \frac{t_x}{h_x}(za_3 - xc_3)\right] ds;\quad C_{\eta t} = 0;\\ C_{zt} = \mp\int\limits_o^s \varepsilon\left[\frac{t_z}{h_z}(xb_1 - ya_1) + \frac{t_x}{h_x}(xb_3 - ya_3)\right] ds;\quad C_{\zeta t} = 0. \end{cases}$$

Durch die vorstehenden Entwicklungen sind die kennzeichnenden Eigenschaften des räumlich gewundenen Trägers in den Grundgleichungen klargelegt. Die Anwendung des Rechnungsverfahrens wird nun an einem praktischen Zahlenbeispiel gezeigt.

II. Anwendung der Elastizitätsgleichungen.

Die Gleichung der Bogenachse des in Abb. 9 (S. 223) dargestellten Trägers lautet:

$$u = e\cdot p^2,\qquad v = l_1\cdot p\,,\qquad w = f\cdot p^4.$$

Hierbei sind

$$e = 5{,}0\ \text{m},\qquad f = 10{,}0\ \text{m},\qquad l_1 = 20{,}0\ \text{m}.$$

Durch die Grenzwerte $-1 < p < +1$ ist die Lage der Kämpfer festgelegt. Bildet man die abgeleiteten

$$\frac{du}{dp} = 2ep,\quad \frac{dv}{dp} = l_1,\quad \frac{dw}{dp} = 4f\cdot p^3,\quad \frac{ds}{dp} = \sqrt{4e^2p^2 + l_1^2 + 16f^2\cdot p^6},$$
$$\frac{d^2u}{dp^2} = 2e\,,\qquad \frac{d^2v}{dp^2} = 0\,,\qquad \frac{d^2w}{dp^2} = 12f\cdot p^2,$$

9) Um die umständliche Ermittlung neuer Richtungsbeizahlen überhaupt zu vermeiden, empfiehlt es sich auch bei Anwendung des Näherungsverfahrens, das x, y, z-Achsenkreuz nur aus einer Parallelverschiebung des u, v, w-Achsenkreuzes zu gewinnen. Wie sich dann die Elastizitätsgleichungen gestalten, wird im Beispiel gezeigt.

$$A = \frac{dv}{dp}\cdot\frac{d^2w}{dp^2} - \frac{d^2v}{dp^2}\cdot\frac{dw}{dp} = \quad 12 f l_1 \cdot p^2,$$

$$B = \frac{dw}{dp}\cdot\frac{d^2u}{dp^2} - \frac{d^2w}{dp^2}\cdot\frac{du}{dp} = -16 e f p^3,$$

$$C = \frac{du}{dp}\cdot\frac{d^2v}{dp^2} - \frac{d^2u}{dp^2}\cdot\frac{dv}{dp} = -2 l_1 e,$$

so gelten für die Richtungsbeizahlen, unter der Voraussetzung, daß das x, y, z-Achsenkreuz dem u, v, w-Achsenkreuz parallel sein soll, die Formeln:

$$a_2 = \frac{du}{ds}, \qquad b_2 = \frac{dv}{ds}, \qquad c_2 = \frac{dw}{ds},$$

$$a_3 = \frac{A}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}, \; b_3 = \frac{B}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}}, \; c_3 = \frac{C}{\sqrt{A^2+B^2+C^2}},$$

$$a_1 = b_2 c_3 - b_3 c_2, \qquad b_1 = c_2 a_3 - c_3 a_2, \qquad c_1 = a_2 b_3 - a_3 b_2.$$

Ist die Bedingung

$$GF_1 = EF_2 = GF_3 = GF,$$
$$EI_1 = GI_2 = EI_3 = EI$$

erfüllt und nimmt man für $EI\cdot\frac{dp}{ds}$ den unveränderlichen Mittelwert $EI\cdot\frac{dp}{ds} = \frac{EI_c}{l_1}$, so ergibt sich:

$$\varkappa = \frac{\int_o^s u\cdot\frac{ds}{EI}}{\int_o^s\frac{ds}{EI}} = \frac{EI_c\cdot l_1\int_o^1 u\,dp}{EI_c\cdot l_1\int_o^1 dp} = \frac{\int_o^1 u\,dp}{\int_o^1 dp} = \frac{e}{3} = 1{,}6667 \text{ m},$$

$$\lambda = \frac{\int_o^s w\cdot\frac{ds}{EI}}{\int_o^s\frac{ds}{EI}} = \frac{\int_o^1 w\,dp}{\int_o^1 dp} = \frac{f}{5} = 2{,}00 \text{ m}.$$

Das x, y, z-Achsenkreuz wird nun durch die Gleichungen

$$x = u - \varkappa, \qquad y = v, \qquad z = w - \lambda$$

festgelegt. Die entsprechenden Werte für verschiedene Punkte der Bogenachse sind in Tabelle 1 zusammengestellt:

Tabelle 1.

p	+0,0	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8	+1,0
u	+0,0	+0,20	+0,80	+1,80	+3,20	+5,00
x	−1,6667	−1,4667	−0,8667	+0,1333	+1,5333	+3,3333
$y=v$	+0,0	+4,0	+8,0	+12,0	+16,0	+20,0
w	+0,0	+0,016	+0,256	+1,296	+4,096	+10,00
z	−2,0	−1,984	−1,744	−0,704	+2,096	+8,00
a_1	+1,0	+0,8960	+0,4317	+0,1228	−0,0921	−0,2373
b_1	±0,0	−0,0965	−0,1989	−0,4244	−0,6941	−0,8444
c_1	±0,0	+0,4333	+0,8798	+0,8971	+0,7139	+0,4815
a_2	±0,0	+0,0995	+0,1946	+0,2655	+0,2692	+0,2182
b_2	+1,0	+0,9949	+0,9729	+0,8850	+0,6729	+0,4361
c_2	±0,0	+0,0159	+0,1245	+0,3823	+0,6890	+0,8729
a_3	±0,0	−0,4326	−0,8808	−0,9563	−0,9587	−0,9457
b_3	±0,0	+0,0288	+0,1174	+0,1913	+0,2556	+0,3152
c_3	+1,0	+0,9011	+0,4587	+0,2214	+0,1248	+0,0867

Vernachlässigt man den äußerst geringen Einfluß der Axial- und Querkräfte, so gewinnt man für die Beizahlen der statisch unbestimmten Größen in den Elastizitätsgleichungen VII^a) die folgenden Werte:

$$EI_c\int_o^s\frac{ds}{EI} = l_1\int_o^1 dp = l_1 = 20{,}0 \text{ m}$$
$$= EI_c\cdot\omega_{\xi\xi} = EI_c\cdot\omega_{\eta\eta} = EI_c\cdot\omega_{\zeta\zeta};$$

$$EI_c\int_o^s x^2\frac{ds}{EI} = e^2 l_1\int_o^1\left(p^2-\frac{1}{3}\right)^2 dp = \frac{4}{45}\cdot e^2 l_1 = 44{,}4444 \text{ m}^3;$$

$$EI_c\int_o^s y^2\frac{ds}{EI} = l_1^3\int_o^1 p^2\,dp = \frac{l_1^3}{3} = 2666{,}6667 \text{ m}^3;$$

$$EI_c\int_o^s z^2\frac{ds}{EI} = f^2 l_1\int_o^1\left(p^4-\frac{1}{5}\right)^2 dp = \frac{16}{225}\cdot f^2 l_1$$
$$= 142{,}2222 \text{ m}^3;$$

$$EI_c\int_o^s xz\frac{ds}{EI} = e f l_1\int_o^1\left(p^2-\frac{1}{3}\right)\left(p^4-\frac{1}{5}\right)dp = \frac{8}{105}\cdot e f l_1$$
$$= 76{,}1905 \text{ m}^3 = -EI_c\cdot\delta_{xz};$$

$$EI_c\cdot\delta_{xx} = \int_o^s(y^2+z^2)\frac{ds}{EI}\cdot EI_c = 2808{,}8889 \text{ m}^3;$$

$$EI_c\cdot\delta_{yy} = EI_c\int_o^s(z^2+x^2)\frac{ds}{EI} = 186{,}6666 \text{ m}^3;$$

$$EI_c\cdot\delta_{zz} = EI_c\int_o^s(x^2+y^2)\frac{ds}{EI} = 2711{,}1111 \text{ m}^3.$$

Da durch die Wahl des Koordinatensystems die Bedingungen $\int_o^s x\frac{ds}{EI} = \int_o^s z\frac{ds}{EI} = 0$ erfüllt sind, so hat man auch $\mu_{x\zeta} = \mu_{\xi z} = \mu_{y\zeta} = \mu_{\eta z} = 0$.

Wir lassen nun am Scheitel eine Kraft P angreifen und zerlegen diese in ihre drei Teilkräfte P_x', P_y' und P_z'. Da der Angriffspunkt mit dem Ursprung des u, v, w-Achsenkreuzes zusammenfällt, so bestehen die Beziehungen $x_0 = u$, $y_0 = v$, $z_0 = w$.

Die Teilkraft P_x' ruft im Hauptsystem die Spannkräfte

$$X_0' = \pm P_x'\cdot\frac{a_1}{2}, \quad Y_0' = P_x'\cdot\frac{a_2}{2}, \quad Z_0' = \pm P_x'\cdot\frac{a_3}{2},$$

$$\xi_0' = P_x'\frac{(y_0 c_1 - z_0 b_1)}{2}, \quad \eta_0' = \pm\frac{P_x'}{2}(y_0 c_2 - z_0 b_2),$$

$$\zeta_0' = \frac{P_x'}{2}(y_0 c_3 - z_0 b_3)$$

hervor. Das obere Vorzeichen gilt hierbei für die linke, das untere für die rechte Trägerhälfte.

Die Formeln 17) liefern für den vorliegenden Symmetriefall A:

$$EI_c\cdot A_x = EI_c\cdot A_\eta = EI_c\cdot A_z = EI_c\cdot A_\xi = 0;$$

$$EI_c\cdot A_y = EI_c\cdot\frac{P_x'}{2}\int_o^s x\,y_0\cdot\frac{ds}{EI} = \frac{P_x'}{2}\cdot l_1^2 e\int_o^1 p\left(p^2-\tfrac{1}{3}\right)dp$$
$$= \frac{P_x'}{24}\cdot l_1^2 e = 83{,}3333\, P_x' (\text{m}^3);$$

$$EI_c\cdot A_\zeta = -EI_c\cdot\frac{P_x'}{2}\int_o^s y_0\cdot\frac{ds}{EI} = -\frac{P_x}{2}\cdot l_1^2\int_o^1 p\cdot dp$$
$$= -\frac{P_x'}{4}\cdot l_1^2 = -100{,}0\, P_x' (\text{m}^2).$$

Aus dem Gleichungssystem VII^a) ergibt sich somit:

$$X = \eta = Z = \xi = 0;$$

$$Y = \frac{EI_c\cdot A_y}{EI_c\cdot\delta_{yy}} = 0{,}4464\, P_x'; \quad \zeta = \frac{EI_c\cdot A_\zeta}{EI_c\cdot\omega_{\zeta\zeta}} = -5{,}0\, P_x' (\text{m}).$$

Die endgültigen Spannungsgleichungen lauten also:

$$\text{a)}\quad\left\{\begin{aligned}
X' &= \pm P_x'\left(\frac{a_1}{2} + 0{,}4464\, b_1\right);\\
Y' &= P_x'\left(\frac{a_2}{2} + 0{,}4464\, b_2\right);\\
Z' &= \pm P_x'\left(\frac{a_3}{2} + 0{,}4464\, b_3\right);\\
\xi' &= P_x'\left[\frac{y_0 c_1 - z_0 b_1}{2} + 0{,}4464(z a_1 - x c_1) - 5{,}0\cdot c_1\right];\\
\eta' &= \pm P_x'\left[\frac{y_0 c_2 - z_0 b_2}{2} + 0{,}4464(z a_2 - x c_2) - 5{,}0\cdot c_2\right];\\
\zeta' &= P_x'\left[\frac{y_0 c_3 - z_0 b_3}{2} + 0{,}4464(z a_3 - x c_3) - 5{,}0\, c_3\right].
\end{aligned}\right.$$

Infolge der Teilkraft P_y' entstehen Spannkräfte im Hauptsystem

$$X_0' = P_y'\cdot\frac{b_1}{2},\quad Y_0' = \pm P_y'\cdot\frac{b_2}{2},\quad Z_0' = P_y'\cdot\frac{b_3}{2},$$

$$\xi_0' = \pm\frac{P_y'}{2}(z_0 a_1 - x_0 c_1),\quad \eta_0' = \frac{P_y'}{2}(z_0 a_2 - x_0 c_2),$$

$$\zeta_0' = \pm\frac{P_y'}{2}(z_0 a_3 - x_0 c_3).$$

Es werden daher

$$EI_c\cdot A_y = EI_c\cdot A_\xi = EI_c\cdot A_\eta = EI_c\cdot A_\zeta = 0.$$

$$EI_c\cdot A_x = EI_c\cdot\frac{P_y'}{2}\int_0^s x_0\cdot y\cdot\frac{ds}{EI} = \frac{P_y'}{2}\cdot e\cdot l_1^2\int_0^1 p^3 dp = \frac{P_y'}{8}\cdot e\cdot l_1^2 = 250\, P_y'\,(\mathrm{m}^3),$$

$$EI_c\cdot A_z = EI_c\cdot\frac{P_y'}{2}\int_0^s z_0\cdot y\cdot\frac{ds}{EI} = \frac{P_y'}{2}\cdot f\cdot l_1^2\int_0^1 p^5 dp = \frac{P_y'}{12}\cdot f\cdot l_1^2 = 333{,}3333\, P_y'\,(\mathrm{m}^3).$$

Das Gleichungssystem VII[a]) liefert:

$$Y = \xi = \eta = \zeta = 0.$$
$$EI_c\cdot\delta_{xx}\cdot X + EI_c\cdot\delta_{xz}\cdot Z = EI_c\cdot A_x,$$
$$EI_c\cdot\delta_{xz}\cdot Z + EI_c\cdot\delta_{zz}\cdot Z = EI_c\cdot A_z.$$

Hieraus erhält man nach Einsetzen der Zahlenwerte: $X = 0{,}1895\, P_y'$, $Z = 0{,}2575\, P_z'$. Und dementsprechend ergibt sich jetzt:

$$\text{b)}\quad\left\{\begin{aligned}
X' &= + P_y'\left(0{,}1895\, a_1 + \frac{b_1}{2} + 0{,}2575\, c_1\right);\\
Y' &= \pm P_y'\left(0{,}1895\, a_2 + \frac{b_2}{2} + 0{,}2575\, c_2\right);\\
Z' &= + P_y'\left(0{,}1895\, a_3 + \frac{b_3}{2} + 0{,}2575\, c_3\right);\\
\xi' &= \pm P_y'\left[0{,}1895\,(y c_1 - z b_1) + \tfrac{1}{2}(z_0 a_1 - x_0 c_1) + 0{,}2575\,(x b_1 - y a_1)\right];\\
\eta' &= P_y'\left[0{,}1895\,(y c_2 - z b_2) + \tfrac{1}{2}(z_0 a_2 - x_0 c_2) + 0{,}2575\,(x b_2 - y a_2)\right];\\
\zeta' &= \pm P_y'\left[0{,}1895\,(y c_3 - z b_3) + \tfrac{1}{2}(z_0 a_3 - x_0 c_3) + 0{,}2575\,(x b_3 - y a_3)\right].
\end{aligned}\right.$$

Es ist in der Praxis vielfach üblich, räumlich gewundene Tragwerke so zu behandeln, als ob sie aus zwei einzelnen Trägern bestehen würden, deren Mittellinien mit den Abbildungen der wirklichen Bogenachse auf zwei senkrecht zueinander stehenden Ebenen zusammenfielen. Für einen in der Y-Z-Ebene liegenden Träger würden die Gleichungen 21) und XI) liefern:

$$X = \frac{EI_c\cdot A_x}{EI_c\int_0^s (y^2+z^2)\frac{ds}{EI}} = \frac{250}{2808{,}8889}\, P_y' = 0{,}0891\, P_y';$$

$$Z = \frac{EI_c\cdot A_z}{EI_c\int_0^s y^2\frac{ds}{EI}} = \frac{333{,}3333}{2666{,}6667}\, P_y' = 0{,}125\, P_y';$$

$$Y = \xi = \eta = \zeta = 0.$$

In ähnlicher Weise würde man für einen in der X-Y-Ebene liegenden Träger erhalten:

$$X = \frac{EI_c\cdot A_x}{EI_c\int_0^s y^2\frac{ds}{EI}} = \frac{250}{2666{,}6667}\, P_y' = 0{,}09375\, P_y';$$

$$Z = \frac{EI_c\cdot A_z}{EI_c\int_0^s (x^2+y^2)\frac{ds}{EI}} = \frac{333{,}3333}{2711{,}1111} = 0{,}123\, P_y';$$

$$Y = \xi = \eta = \zeta = 0.$$

Faßt man die entsprechenden Werte zusammen, so ergibt sich: $X = 0{,}18285\, P_y'$, $Z = 0{,}248\, P_y'$.

Diese Werte unterscheiden sich von den genauen nur sehr wenig. Trotz dieser guten Übereinstimmung dürfte es sich unseres Erachtens empfehlen, das Näherungsverfahren nur mit Vorsicht zu gebrauchen, weil es noch nicht bewiesen ist, daß bei allen Bogengestaltungen und Belastungsarten die Zurückführung räumlicher Trägergebilde auf ebene Gebilde zuverlässige Ergebnisse liefern kann.

Die Teilkraft P_z' erzeugt im Hauptsystem Spannkräfte:

$$X_0' = \pm\frac{c_1}{2}P_z',\quad Y_0' = \frac{c_2}{2}P_z',\quad Z_0' = \pm\frac{c_3}{2}P_z',$$

$$\xi_0' = \frac{P_z'}{2}(x_0 b_1 - y_0 a_1),\quad \eta_0' = \pm\frac{P_z'}{2}(x_0 b_2 - y_0 a_2),$$

$$\zeta_0' = \frac{P_z'}{2}(x_0 b_3 - y_0 a_3).$$

Denselben entsprechen die Belastungsglieder

$$A_x = A_\eta = A_z = A_\zeta = 0,$$

$$EI_c\cdot A_y = EI_c\cdot\frac{P_z'}{2}\int_0^s y_0\cdot z\frac{ds}{EI} = \frac{P_z'}{2}\, l_1^2 f\int_0^1 p\left(p^4 - \frac{1}{5}\right)dp = \frac{P_z'}{60}\cdot l_1^2 f = 66{,}6667\, P_z'(\mathrm{m}^3),$$

$$EI_c\cdot A_\xi = EI_c\cdot\frac{P_z'}{2}\int_0^s y_0\frac{ds}{EI} = \frac{P_z'}{2}\cdot l_1^2\int_0^1 p\,dp = \frac{P_z'}{4}\, l_1^2 = +100\, P_z'(\mathrm{m}^2)$$

und die Elastizitätsgleichungen:

$$Y = \frac{EI_c\cdot A_y}{EI_c\cdot\delta_{yy}} = 0{,}3571\, P_z',\quad \xi = \frac{EI_c\cdot A_\xi}{EI_c\cdot\omega_{\xi\xi}} = +5{,}0\, P_z',$$
$$X = Z = \eta = \zeta = 0.$$

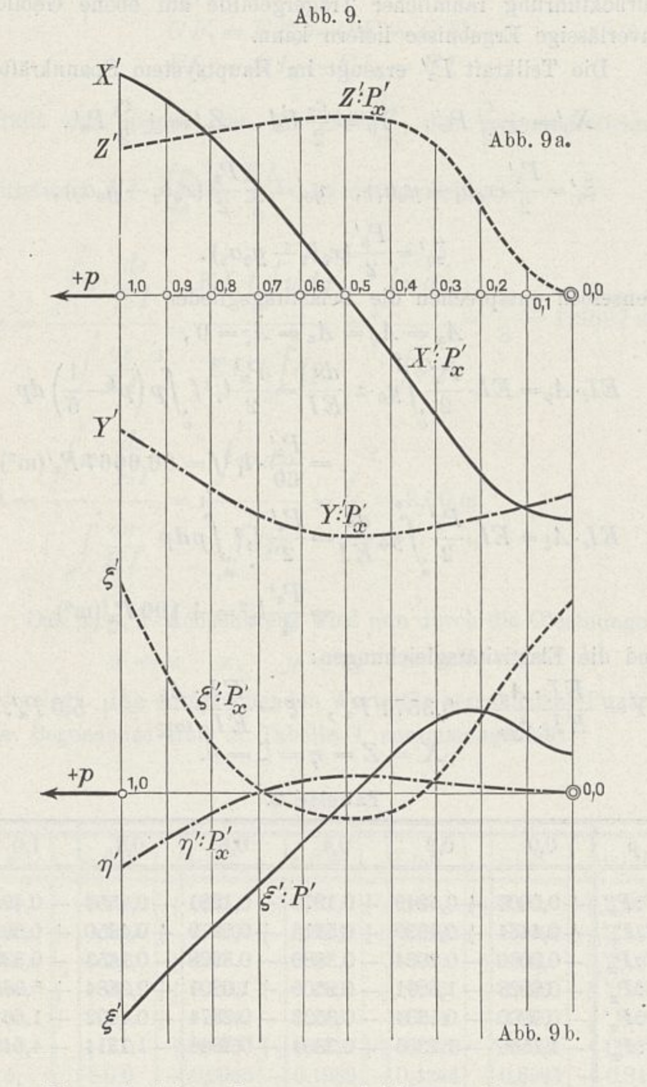
Tabelle 2.

p	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$X':P_x'$	+0,5000	+0,4049	+0,1270	−0,1281	−0,3558	−0,4955
$Y':P_x'$	+0,4464	+0,4939	+0,5316	+0,5279	+0,4350	+0,3039
$Z':P_x'$	−0,0000	−0,2034	−0,3880	−0,3928	−0,3653	−0,3321
$\xi':P_x'$	−0,8928	−1,8091	−0,8500	+1,0801	+2,9884	+5,0656
$\eta':P_x'$	−0,0000	−0,1334	−0,3523	−0,2974	+0,4692	+1,6628
$\zeta':P_x'$	−4,2560	−1,7305	+0,3894	+0,3848	−1,1314	−4,6488
$X':P_y'$	+0,1895	+0,2332	+0,2088	+0,0421	−0,1808	−0,3432
$Y':P_y'$	+0,5000	+0,5205	+0,5555	+0,5912	+0,5648	+0,4845
$Z':P_y'$	+0,2575	+0,1644	+0,0099	−0,0284	−0,0218	+0,0007
$\xi':P_y'$	−0,0000	−0,6304	+0,1264	+0,8606	+1,2148	+1,2120
$\eta':P_y'$	−0,0502	−0,0929	−0,1326	+0,0254	+0,4273	+0,8063
$\zeta':P_y'$	+0,0000	+1,0350	+2,2262	+2,6716	+2,1646	+0,0464
$X':P_z'$	+0,0000	+0,1828	+0,3689	+0,2970	+0,1090	−0,0608
$Y':P_z'$	+0,3571	+0,3632	+0,4096	+0,5072	+0,5848	+0,5922
$Z':P_z'$	+0,5000	+0,4608	+0,2712	+0,1790	+0,1537	+0,1560
$\xi':P_z'$	+4,2858	+2,2704	+0,3556	−0,5784	−1,2940	−2,1756
$\eta':P_z'$	+0,0000	+0,3358	+0,5010	+0,4460	+0,0932	−0,4157
$\zeta':P_z'$	+0,5952	−0,5165	−0,1434	+1,3584	+2,4992	+2,7116

Aufriß.

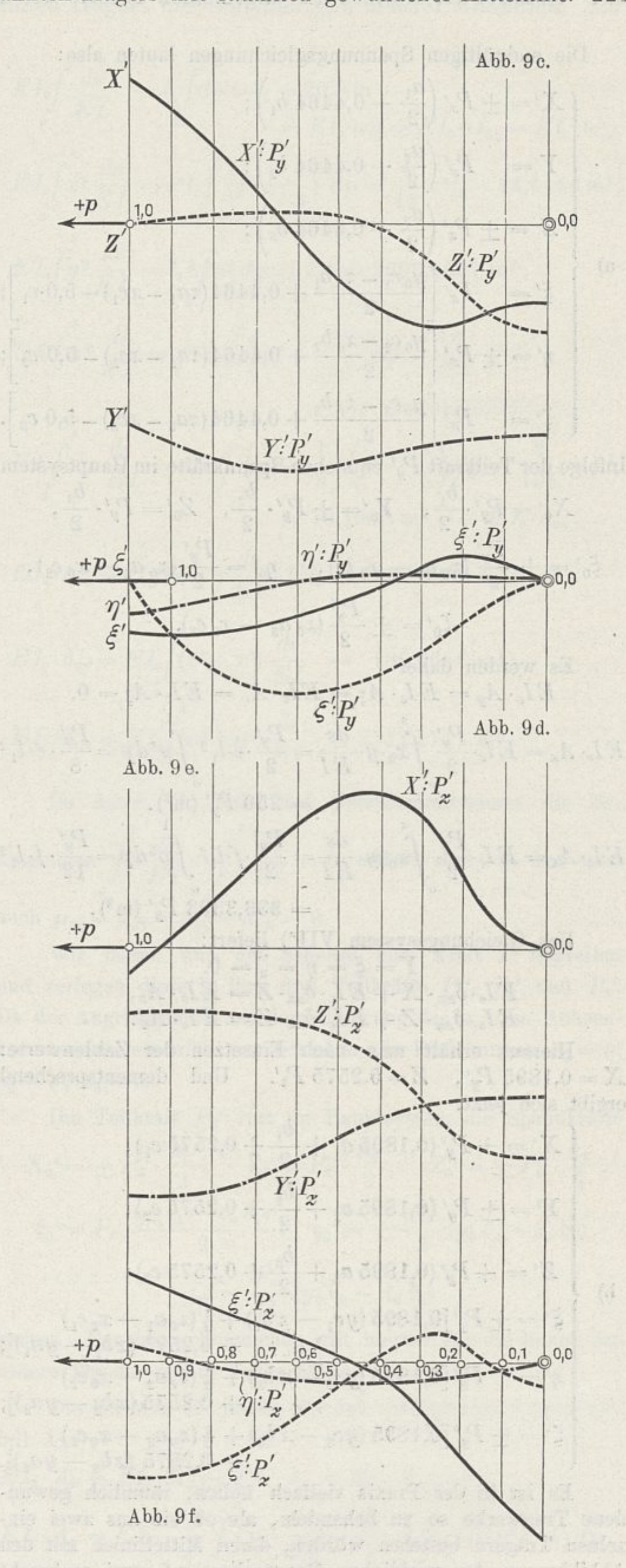
Grundriß.

Abb. 9.



Die endgültigen Spannungsgleichungen lauten:

$$
\text{c)}\quad
\begin{cases}
X' = \pm P_x'\left(0{,}3571\, b_1 + \dfrac{c_1}{2}\right); \\
\xi' = \quad P_x'[5{,}0\, a_1 + \tfrac{1}{2}(x_0\, b_1 - y_0\, a_1) + 0{,}3571(\varkappa a_1 - x c_1)]; \\
Y' = \quad P_x'\left(0{,}3571\, b_2 + \dfrac{c_2}{2}\right); \\
\eta' = \pm P_x'[5{,}0\, a_2 + \tfrac{1}{2}(x_0\, b_2 - y_0\, a_2) + 0{,}3571(\varkappa a_2 - x c_2)]; \\
Z' = \pm P_x'\left(0{,}3571\, b_3 + \dfrac{c_3}{2}\right); \\
\zeta' = \quad P_x'[5{,}0\, a_3 + \tfrac{1}{2}(x_0\, b_3 - y_0\, a_3) + 0{,}3571(\varkappa a_3 - x c_2)].
\end{cases}
$$



Auf Grund der Formeln a), b), c) gewinnt man die in der Tabelle 2 zusammengestellten und in den Abb. 9 a bis f eingetragenen Werte. Diese Darstellungen zeigen sehr deutlich den ständigen Wechsel in der Größe und in der Richtung der Spannungen und lassen zugleich erkennen, wie sehr das räumliche Kräftespiel bei den mannigfaltigen Verknüpfungen zwischen Druck, Biegung, Schub und Verwindung einer genauen Beachtung bedarf.

Buchdruckerei des Waisenhauses in Halle a. d. S.